

Carla Sofia Sampaio Leandro

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil



Avaliação do Clima Interior da Igreja de São Cristóvão em Lisboa

Dissertação para obtenção do grau de mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Doutor Fernando M. A. Henriques, Professor Catedrático, Faculdade
de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Antão

Arguente: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Vogal: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2014

Avaliação do Clima Interior da Igreja de São Cristóvão em Lisboa

“Copyright” Carla Sofia Sampaio Leandro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Fernando Henriques pela oportunidade, por toda a disponibilidade, pela orientação e conhecimento científico transmitido ao longo desta dissertação.

Em segundo lugar gostaria de agradecer à Paróquia de São Cristóvão, em particular ao Padre Edgar Clara, por possibilitar a realização deste estudo e por se mostrar sempre disponível para me receber durante a recolha de dados. Não poderia deixar de agradecer ao senhor Luís Nobre por tantas vezes me receber e acompanhar até à Igreja.

Gostaria de agradecer Engenheiro Vítor Silva, pela sua disponibilidade e ajuda durante este trabalho.

Ao Hugo Silva gostaria de agradecer o seu apoio, os seus conselhos, boa vontade e sinceridade durante a realização deste trabalho, mas principalmente na ajuda que me deu na revisão final.

À minha grande amiga Andreia Lopes, uma companheira ao longo de todo o meu percurso académico, gostaria de lhe agradecer não só pelo seu apoio e sinceridade durante a realização desta dissertação, mas também por toda a sua ajuda, simpatia, motivação e principalmente amizade ao longo destes anos académicos. À Helena Dias que mesmo a vários quilómetros de distância esteve sempre presente neste percurso com toda a sua amizade e pronta a ajudar. Às minhas amigas Ana D., Cláudia, Mafalda, Ana L., Margarida e Teresa, por todos os momentos de trabalho e convívio.

Não poderia deixar de agradecer à Diana que mesmo sendo uma amiga fora da faculdade me ajudou ao longo do meu percurso académico, facilitando a minha mudança para a Caparica, mostrando grande amizade e companheirismo. Não posso também deixar de agradecer à Neuza D., Neuza J., Tânia, Sónia, Oriana, Célia, Luísa e Paula, por tantos bons momentos, momentos esses que me possibilitaram manter o equilíbrio necessário para terminar esta etapa.

Ao meu ex-namorado Paulo Serralheiro que desde o início me apoiou em todas as minhas decisões, agradeço a sua paciência, respeito, sensatez, amizade e amor. Sem dúvida foi uma pessoa fundamental ao longo deste percurso.

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, por toda a força, motivação, apoio nas minhas decisões sem as questionar, mas principalmente por todo o amor e carinho. Sem dúvida que lhes devo muito e que sem eles este percurso académico não seria possível.

Resumo

Muitos dos edifícios históricos que fazem parte do nosso património apresentam características construtivas que lhes permitem o desenvolvimento de um microclima particular no seu interior. Esse microclima pode apresentar temperaturas e humidades relativas desadequadas para a conservação dos materiais e dos artefactos, contribuindo para a degradação dos materiais. O conhecimento do microclima permite avaliar as condições higrotérmicas e assim perceber se são as adequadas para a conservação do edifício e dos seus artefactos.

A presente dissertação tem como objectivo caracterizar as condições higrotérmicas no interior da Igreja de São Cristóvão em Lisboa. Para tal foram realizadas medições automáticas da temperatura do ar interior e temperatura superficial numa parede orientada a norte. Estas medições foram realizadas através de vinte e cinco sensores distribuídos pelo interior da igreja, um na torre norte e outro no desvão da cobertura. As medições realizaram-se entre os dias 1 de Novembro de 2012 e 18 de Julho de 2013, com registos a cada 10 minutos e permitiram, por meio de um tratamento estatístico, analisar a evolução da temperatura e humidade relativa no interior e exterior da igreja. De forma complementar, realizaram-se duas baterias de leituras de temperatura do ar e humidade relativa em trinta e quatro pontos ao longo da nave principal da igreja. Efectuaram-se também, medições de temperaturas superficiais em dezassete pontos e recolheram-se imagens de termografia ao longo de nave principal.

Na sequência da análise é possível verificar que as condições exteriores apresentam pouca influência nos ciclos diários e que a elevada inércia térmica do edifício causa um atraso sazonal. Ao longo do período de monitorização não ocorreram condensações superficiais. Com base nos resultados obtidos observou-se que o clima interior é estável, apresentando apenas pequenas variações ao longo do dia. Constatou-se que as amplitudes médias diárias de temperatura não são prejudiciais para a conservação dos materiais e artefactos, mas que as amplitudes médias diárias podem ser desfavoráveis para a conservação.

Palavras-chave:

Conservação; património; igreja; humidade relativa; temperatura; microclima; inércia térmica.

Abstract

Many of the historic buildings that are part of our heritage have constructive characteristics that allow them to develop a particular microclimate inside. This microclimate can present temperatures and relative humidity inadequate for the conservation of materials and artefacts, contributing to the degradation of materials. The knowledge of the microclimate allows to evaluate the thermal and relative humidity conditions and to understand if are suitable for the conservation of the building and its artifacts.

The present dissertation aims to characterize the thermal and relative humidity conditions in the interior of the Church of São Cristovão in Lisbon. Automatic measurements were made of the air temperature and surface temperature on a wall facing north. These measurements were performed through twenty-five distributed sensors inside the Church, one in the North Tower and another in the attic. The measurements were performed between November 1, 2012 and July 18, 2013, with records every 10 minutes and allowed, by means of a statistical treatment, analyze the evolution of temperature and relative humidity in the interior and exterior of the Church. Supplementary shaped, there were two batteries of readings of air temperature and relative humidity in thirty-four points along the nave of the Church. Also were carried out, measurements of surface temperatures in seventeen points and collected images of thermography along main vessel.

It is possible to verify that external conditions have little influence in daily cycles and high thermal inertia of the building cause a seasonal lag. Throughout the monitoring period did not occur surface condensations. The results showed that the indoor climate is stable, showing only slight variations throughout the day. It was observed that the average daily amplitudes of temperature are not harmful to the conservation of materials and artefacts, but the average daily amplitudes may be unfavourable to conservation.

Keywords:

Conservation; patrimony; church; relative humidity; temperature; microclimate; thermal inertia.

Índice de Matérias

Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objectivo e metodologia	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
 Conservação de edifícios históricos	 5
2.1 A importância do Património	5
2.2 A evolução histórica da conservação	6
 Humidade e temperatura	 11
3.1 Conceito de humidade	11
3.1.1 Equação dos gases perfeitos	11
3.1.2 Pressão parcial de vapor de água	12
3.1.3 Relação entre mistura de ar seco e vapor de água	13
3.1.4 Humidade absoluta	14
3.1.5 Concentração de vapor de água	14
3.1.6 Humidade relativa	15
3.1.7 Temperatura do ponto de orvalho	17
3.2 Conceito de temperatura	19
3.2.1 Trocas de calor por condução	19
3.2.2 Trocas de calor por convecção	20
3.2.3 Trocas de calor por radiação	22
 Temperatura e humidade em edifícios	 25
4.1 Temperatura em edifícios	25
4.2 Humidade em edifícios	26
4.2.1 Mecanismos fundamentais de transferência de humidade	27
4.2.1.1 Absorção e adsorção	27

4.2.1.2	Condensações	29
4.2.1.2.1	Condensações superficiais	29
4.2.1.2.2	Condensações superficiais em edifícios com elevada inércia térmica...	30
4.2.1.2.3	Condensações internas	31
4.2.1.3	Capilaridade	32
Microclima, processos de degradação e condições ideais para conservação		35
5.1	Microclima	35
5.2	Mecanismos de degradação	36
5.2.1	Mecanismos de degradação por temperatura	36
5.2.2	Mecanismos de degradação por humidade	37
5.2.3	Condições ideais para conservação	39
Caso de estudo		45
6.1	Descrição do edifício	45
6.2	Identificação de anomalias	48
6.3	Descrição dos ensaios	53
6.3.1	Equipamentos utilizados	53
6.3.1.1	Data Logger	53
6.3.1.2	Termopares	54
6.3.1.3	Sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl	55
6.3.1.4	Hobo U12-13	56
6.3.1.5	Rotronic Hygrolog HL-NT2	57
6.3.1.6	Aparelho de medição de temperaturas superficiais	58
6.3.1.7	ThermaCAM B4	59
6.3.2	Monitorização automática do clima interior e exterior da igreja	59
6.3.2.1	Breve descrição das medições realizadas pelos termopares e pela sonda de temperatura e humidade relativa	60
6.3.2.2	Breve descrição das medições realizadas com os sensores Hobo U12-13 e Rotronic Hygrolog	63
6.3.2.3	Tratamento de dados	65
6.3.3	Monitorização manual	66
6.3.3.1	Descrição das medições	66
6.3.3.2	Tratamento de dados	69

Análise e discussão de resultados	71
7.1 Monitorização automática	71
7.1.1 Análise Geral	71
7.1.2 Análise por estação do ano	85
7.1.2.1 Outono	85
7.1.2.2 Inverno	91
7.1.2.3 Primavera	97
7.1.2.4 Verão	103
7.2 Monitorização manual	109
7.2.1 Bateria de medição da temperatura e humidade relativa	109
7.2.1.1 Inverno – 18 de Janeiro de 2013	109
7.2.1.2 Primavera – 24 de Abril de 2013	116
7.2.2 Medição de temperaturas superficiais	121
7.3 Relação entre o clima interior e o exterior e análise dos ciclos diários e o seu efeito para a conservação	134
7.4 Análise comparativa	138
 Conclusões e desenvolvimentos futuros	 143
 Bibliografia	 145

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 – Normas e especificações de temperatura e humidade relativa [8]	40
Tabela 6.1 – Distribuição dos sensores pela igreja.....	60
Tabela 6.2 – Distribuição dos sensores Hobo U12-13 e Rotronic pela igreja.....	63
Tabela 6.3 – Localização dos pontos de medição das temperaturas superficiais	66
Tabela 7.1 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro 2012.....	86
Tabela 7.2 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 3 de Fevereiro a 9 de Fevereiro 2013	92
Tabela 7.3 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho de 2013	98
Tabela 7.4 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho de 2013	104
Tabela 7.5 – Temperatura superficial e humidade relativa no dia 4 de Março de 2013	121
Tabela 7.6 – Temperatura superficial e humidade relativa no dia 26 de Março de 2013.....	127
Tabela 6.7 – Temperatura superficial e humidade relativa no dia 20 de Abril de 2013	129

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Diagrama psicométrico [20]	17
Figura 4.1 – Curva de adsorção e desadsorção [14]	28
Figura 4.2 – Curva de adsorção e desadsorção; efeito de histerese (pedra calcária) [4]	29
Figura 4.3 – Efeito da inércia térmica [alterado de 22].....	30
Figura 4.4 – Fenómeno da capilaridade [5]	32
Figura 6.1 – Igreja de São Cristóvão	45
Figura 6.2 – Interior da igreja de São Cristóvão	46
Figura 6.3 – Igreja de São Cristóvão [34]	47
Figura 6.4 – Igreja de São Cristóvão [34]	48
Figura 6.5 – Degradação do reboco	49
Figura 6.6 – Degradação do reboco e manchas escuras na zona inferior das paredes	49
Figura 6.7 – Degradação das cantarias.....	50
Figura 6.8 – Alterações cromáticas nas parede.....	50
Figura 6.9 – Escurecimento de pintura a óleo	51
Figura 6.10 – Fragmentação da pintura a óleo e da talha.....	51
Figura 6.11 – Escurecimento da pintura a óleo e da talha do altar-mor	52
Figura 6.12 – Bolores na cornija.....	52
Figura 6.13 – Degradação do tecto	53
Figura 6.14 – Data Logger DL 2	54
Figura 6.15 – Termopares do tipo T	55
Figura 6.16 – Esquema da sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl [34]	56
Figura 6.17 – Sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl	56
Figura 6.18 – Hobo U12-13	57
Figura 6.19 – R tonic Hygrolog HL-NT2 e cabo para ligação ao computador	58
Figura 6.20 – Aparelho de medição de temperaturas superficiais	58
Figura 6.21 – ThermaCAM B4.....	59
Figura 6.22 – Planta da distribuição dos sensores pela igreja [adaptada de 34].....	61
Figura 6.23 – Corte longitudinal com distribuição dos sensores pela igreja [adaptada de 34]	62
Figura 6.24 – Distribuição dos sensores pela nave principal da igreja.....	62

Figura 6.25 – Planta com distribuição dos HOBO U12-13 e dos Rotronic [adaptada de 34].64	
Figura 6.26 – Corte longitudinal com distribuição dos HOBO U12-13 e dos Rotronic [adaptada de 34]	64
Figura 6.27 – Planta com identificação dos pontos de medição das temperaturas superficiais [adaptada de 34]	67
Figura 6.28 – Planta com identificação dos pontos de medição com recurso ao HOBO U12-13 [34]	68
Figura7.1 – Evolução da temperatura no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	72
Figura7.2 – Evolução média móvel da temperatura no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 15 de Novembro de 2012 e 2 de Julho de 2013	73
Figura 7.3 – Evolução da humidade relativas no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	74
Figura 7.4 – Evolução da média móvel humidade relativas no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 15 de Novembro de 2012 e 2 de Julho de 2013	74
Figura 7.5 – Evolução da temperatura no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no altar, na sacristia e na casa mortuária entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	75
Figura 7.6 – Evolução da humidade relativa no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no altar, na sacristia e na casa mortuária entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013	76
Figura 7.7 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no púlpito norte e no púlpito sul a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	77
Figura 7.8 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no púlpito norte e no púlpito sul a 7,50 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	78
Figura 7.9 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores colocados, na fachada norte, fachada sul e meio da nave junto à entrada a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013	80
Figura 7.10 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte a 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	81
Figura 7.11 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior ao longo de um corte longitudinal no centro na nave principal a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	83
Figura 7.12 – Evolução das temperaturas e humidade relativa no interior ao longo de um corte longitudinal no centro na nave principal a 5,30 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	83
Figura 7.13 – Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013	84

Figura 7.14 – Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012.....	85
Figura 7.15 – Evolução da humidade relativa no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012.....	87
Figura 7.16 – Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012.....	88
Figura 7.17 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012.....	88
Figura 7.18 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012.....	89
Figura 7.19 – Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 4 de Novembro e 11 de Novembro 2012.....	90
Figura 7.20 – Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013.....	91
Figura 7.21 – Evolução da humidade relativa, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013.....	93
Figura 7.22 – Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013.....	94
Figura 7.23 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro 2013.....	94
Figura 7.24 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013.....	95
Figura 7.25 - Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013.....	96
Figura 7.26 - Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho de 2013.....	97
Figura 7.27 - Evolução da humidade relativa no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho de 2013.....	99
Figura 7.28 - Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho.....	99
Figura 7.29 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho.....	100

Figura 7.30 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho	101
Figura 7.31 - Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 26 de Maio e 1 de Junho	102
Figura 7.32 - Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho de 2013	103
Figura 7.33 - Evolução da humidade relativa no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho de 2013.....	104
Figura 7.34 - Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho	105
Figura 7.35 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho	106
Figura 7.36 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho.....	107
Figura 7.37 - Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 30 de Junho e 6 de Julho	108
Figura 7.38 - Mapeamento horizontal de temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013	111
Figura 7.39 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013.....	112
Figura 7.40 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013.....	113
Figura 7.41 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013	114
Figura 7.42 - Mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 18 de Janeiro de 2013	115
Figura 7.43 - Mapeamento vertical da humidade relativa ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 18 de Janeiro de 2013	115
Figura 7.44 - Mapeamento horizontal de temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013	116
Figura 7.45 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013	117
Figura 7.46 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013	118
Figura 7.47 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013	119
Figura 7.48 - Mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 24 de Abril de 2013	120
Figura 7.49 - Mapeamento vertical da humidade relativa ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 24 de Abril de 2013	120
Figura 7.50 - Imagem termográfica do púlpito norte no dia 4 de Março de 2013	122

Figura 7.51 – Fotografia do púlpito norte	122
Figura 7.52 – Imagem termográfica do púlpito sul no dia 4 de Março de 2013	123
Figura 7.53 – Fotografia do púlpito sul	124
Figura 7.54 – Imagem termográfica do altar-mor e do tecto do altar-mor no dia 4 de Março de 201	124
Figura 7.55 – Imagem fotográfica do altar-mor e do tecto do altar-mor	125
Figura 7.56 – Imagem termográfica do altar-mor no dia 4 de Março de 2013	125
Figura 7.57 – Fotografia do altar-mor	126
Figura 7.58 – Imagem termográfica do púlpito norte no dia 26 de Março de 2013.....	128
Figura 7.59 – Imagem termográfica do púlpito sul no dia 26 de Março de 2013	128
Figura 7.60 – Imagem termográfica do altar-mor no dia 26 de Março de 2013.....	129
Figura 7.61 – Imagem termográfica do púlpito norte no dia 20 de Abril de 2013	130
Figura 7.62 – Imagem termográfica do púlpito sul no dia 20 de Abril de 2013.....	131
Figura 7.63 – Imagem termográfica do altar-mor no dia 20 de Abril de 2013.....	131
Figura 7.64 – Imagem termográfica do coro no dia 20 de Abril de 2013.....	132
Figura 7.65 – Imagem fotográfica do coro	132
Figura 7.66 – Imagem termográfica do tecto no dia 20 de Abril de 2013	133
Figura 7.67 – Imagem fotográfica do tecto	133
Figura 7.68 – Relação entre as temperaturas médias diárias exteriores e interiores entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013	134
Figura 7.69 – Relação entre as humidades relativas médias diárias exteriores e interiores entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013	135
Figura 7.70 – Amplitude para os ciclos diários de temperatura no interior da Igreja no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	136
Figura 7.71 – Amplitude para os ciclos diários de temperatura no interior da Igreja no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	136
Figura 7.72 – Temperatura média diária no interior da igreja entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.....	137
Figura 7.73 – Humidade relativa média diária no interior da igreja entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013	137
Figura 7.74 – Evolução da temperatura no exterior e interior da igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34].....	138
Figura 7.75 – Evolução da humidade relativa no exterior e interior da igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34].....	139
Figura 7.76 – Evolução da temperatura e da humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]	139
Figura 7.77 – Evolução da temperatura e da humidade relativa superficial e do ar no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]	141

Figura 7.78 – Amplitude para os ciclos diários de temperatura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34].....	142
Figura 7.79 – Amplitude para os ciclos diários de humidade relativa no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]	142

Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
p	Pressão	[Pa]
V	Volume	[m ³]
n	Número de moles	[-]
R	Constante universal dos gases – 8,3169	[J. mol ⁻¹ . K ⁻¹]
T	Temperatura	[K]
t	Temperatura	[°C]
m	Massa	[Kg]
P_v	Pressão parcial de vapor de água	[Pa]
v	Concentração de vapor de água	[Kg/m ³]
P_{v,sat}	Pressão de saturação	[Pa]
m_v	Massa de vapor de água	[Kg]
m_a	Massa de ar seco	[Kg]
w	Proporção da mistura de ar húmido	[g/g]
P_a	Pressão parcial de ar seco	[Pa]
ρ	Pressão atmosférica	[10000 Pa]
H_r	Humidade relativa	[%]
H_a	Humidade absoluta	[Kg/Kg]
t_s	Temperatura do ponto de orvalho	[°C]

Símbolo	Descrição	Unidades
k	Constante de Boltzmann – $1,38 \times 10^{-23} \text{J}$	[J/K]
E_c	Energia cinética	[-]
q_{conv}	Fluxo de calor por convecção	[-]
h_c	Condutância térmica superficial por convecção	[-]
c	Velocidade da luz - 3×10^8	[m/s]
f	Frequência	[Hz]
λ	Comprimento de onda	[μm]
e	Quantidade de energia dos fótons	[W]
h	Constante de Plank – $6,635 \times 10^{-34}$	[J.s]
Q_{max}	Valor máximo da energia emitida por um corpo	[W]
σ	Constante de Stefan-Boltzman - $5,67 \times 10^{-8}$	[W/m ² .K ⁴]
A	Área	[m ²]
ε	Emissividade	[-]
θ_i	Temperatura superficial	[°C]
t_i	Temperatura interior	[°C]
t_e	Temperatura exterior	[°C]
K	Coeficiente de transmissão térmica	[W/m ² .°C]
L_{sat}	Limite de saturação	[g/m ³]
Q	Quantidade de calor	[W]
q	Fluxo de calor	[W/m ²]
λ	Condutibilidade térmica	[W/m.°C]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Os monumentos históricos chegam até aos nossos dias como testemunhas vivas das tradições de várias gerações, transmitindo a história e a identidade de um país. Ao longo dos séculos os valores humanos ganharam relevância, pelo que os povos consideraram os monumentos antigos como parte do património comum. Deste modo, foi reconhecida uma responsabilidade colectiva de os proteger, mantendo a sua riqueza e autenticidade, para as gerações futuras [36].

Ao longo dos anos as técnicas de construção e as exigências de conforto dos utilizadores evoluíram, principalmente aquelas que se relacionam com a humidade relativa e temperatura no interior dos edifícios. Foram construídos edifícios com paredes mais espessas, aumentando a sua inercia térmica, e consequentemente obtendo uma maior estabilidade higrotérmica no seu interior.

As alterações do microclima natural aceleram a degradação dos materiais e dos artefactos existentes no seu interior. Deste modo, torna-se importante a realização de estudos microclimáticos no interior dos edifícios históricos, pois permitem perceber a resposta térmica do edifício, tal como a sua relação com o exterior, assim como as patologias que podem surgir devido às condições climáticas.

O despertar do interesse e necessidade da conservação dos edifícios históricos, para que estes mantenham a sua autenticidade, ou seja, para que se conservem como foram construídos originalmente, leva a necessidade de perceber como funcionam os parâmetros higrotérmicos. Compreender e conhecer o comportamento higrotérmico das igrejas é fundamental para se poder analisar a qualidade do ar interior e o estado de degradação dos elementos que a compõem, para que se possa eliminar ou minimizar as patologias existentes.

1.2 Objectivo e metodologia

A presente dissertação tem como objectivo estudar as características higrotérmicas da Igreja de São Cristóvão em Lisboa através da monitorização e análise das condições higrotérmicas.

Para tal, foram efectuadas dois tipos de monitorização: monitorização automática e monitorização manual.

Para a monitorização automática foram colocados sensores no interior e exterior do edifício com o objectivo de analisar os ciclos diários no interior e no exterior do edifício. Foram colocados no interior da igreja vinte e cinco sensores distribuídos em planta e em altura. Foi ainda colocado um sensor na torre norte e outro no desvão da cobertura. Os sensores efectuaram registos a cada 10 minutos, entre o dia 1 de Novembro de 2012 e o dia 18 de Julho de 2013.

A análise dos dados foi, inicialmente, realizada de forma geral permitindo identificar as maiores variações dos ciclos de temperatura e humidade relativa ao longo do tempo. Posteriormente foi realizada uma análise com uma menor escala temporal, sendo apenas analisado uma semana em cada estação.

Para a monitorização manual foram efectuadas duas baterias de leituras manuais de temperatura e humidade relativa na nave principal. Essas baterias de leituras permitiram efectuar o mapeamento da nave principal em termos temperatura e da humidade relativa, a realização de mapas de isolinhas coloridos e mapas tridimensionais.

Foram também realizadas medições de temperatura superficial ao longo da nave principal com recurso a uma sonda de medição de temperatura superficial e obtidas imagens com uma câmara de termografia. A medição das temperaturas superficiais permitiram analisar as variações das temperaturas superficiais ao longo da nave principal e verificar se existe a tendência para ocorrência de condensações superficiais.

Este estudo permite conhecer o comportamento higrotérmico do edifício e perceber de que forma é que o microclima é influenciado pelas alterações climáticas, pela presença de pessoas ou outros factores que o possam alterar. Também se pretende identificar as causas das patologias existentes, problemas de saturação e condensações superficiais.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por 8 capítulos, com a seguinte organização:

- Capítulo 1: encontra-se o enquadramento do tem, objectivos e metodologia adoptada;
- Capítulo 2: define-se os conceitos de monumento e património, assim como se refere a importância do património num país. Apresenta-se a evolução histórica da conservação de monumentos;

- Capítulo 3: encontra-se uma descrição de conceitos importantes para a compreensão do tema, tais como os conceitos de humidade e temperatura;
- No capítulo 4 encontra-se descrito de que forma a temperatura pode variar no interior de um edifício e os mecanismos de transferência de humidade;
- No capítulo 5 encontra-se o conceito de microclima, mecanismos de degradação através da temperatura e da humidade e as condições ideais para a conservação;
- No, capítulo 6 encontra-se a descrição do edifício, da metodologia adoptada para a realização do estudo e dos diversos aparelhos utilizados.
- No capítulo 7 apresentam-se os resultados obtidos através de gráficos, e discussão dos mesmos.
- No capítulo 8 encontram-se as principais conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Conservação de edifícios históricos

2.1 A importância do Património

Desde a existência do Homem que se realizam construções para a protecção das pessoas e dos seus bens. Inicialmente sentiu-se a necessidade de construir abrigos bastante rudimentares para protecção contra as condições meteorológicas. Ao longo dos séculos a construção destes abrigos sofreu alterações devido a descoberta de novos materiais de construção e da melhoria das técnicas de construtivas. Essa evolução permitiu a construção de pequenas habitações com melhores condições o que leva à formação de pequenas aldeias, assim como a construção de edifícios de maiores dimensões, com principal destaque para os castelos e edifícios religiosos.

Ao longo dos anos as exigências de conforto dos utilizadores aumentaram pelo que a construção sofreu modificações de modo a adaptar-se à nova realidade, evoluindo até aos dias de hoje. Desta forma verifica-se que a evolução da construção ao longo dos séculos se encontra dependente dos materiais, das técnicas construtivas, dos hábitos sociais e da economia.

É importante referir que nem todos os edifícios antigos são considerados monumentos ou património, pois um edifício antigo pode apenas conter na sua história o passar dos anos e não apresentar qualquer significado cultural. Assim, torna-se imperativo definir os conceitos de cultura, património e monumento.

Do latim, *cultura* apresenta diversos significados tais como a acção de cultivar o solo, o desenvolvimento de certas faculdades através da aquisição de conhecimento, o conjunto de costumes, de instituições e de obras que constituem a herança de uma comunidade ou grupo de comunidades, entre outros. O significado cultural justifica o interesse comum e pode ser tão diverso como o valor artístico, científico, histórico, paisagístico, social ou técnico, sendo esse significado atribuído através da compreensão do seu contributo [27, 42].

Os bens móveis e imóveis são considerados bens culturais quando estes representam testemunho material com valor de civilização ou de cultura. Não se justifica manter esses bens apenas por serem velhos, antigos, diferentes ou bonitos, mas sim por apresentarem interesse cultural relevante, por testemunharem o tempo em que foram construídos e do todo o tempo que passou até chegarem a nós [15, 42].

Considera-se que um monumento é uma entidade identificada como portadora de um valor e que constitui um suporte de memória. Nele, a memória reconhece aspectos relevantes relacionados com actos e pensamentos associados ao curso da história e, todavia, acessível a todos [31]. Um monumento prova, testemunha e assegura a história de uma civilização pelo que deve ser preservado mantendo a sua autenticidade, passando a identidade de um povo de geração em geração.

Património é o conjunto das obras do homem nas quais uma comunidade reconhece os seus valores específicos e particulares e com os quais se identifica. O património deve reflectir o que foi a história de uma região, de um povo, dos seus costumes, ou seja é uma zona, edifício ou até um bem natural que apresenta importância cultural [31].

A identificação e a valorização destas obras como património é, assim, um processo que implica a selecção de valores. Cada comunidade, tendo em conta a sua memória colectiva e consciente do seu passado, é responsável pela identificação e pela gestão do seu património. Os monumentos, considerados como elementos individuais desse património, possuem valores que se alteram com o tempo. Esta alteração de valores que podemos identificar em cada monumento é, afinal, uma das características do património ao longo da História. Através desse processo de mudança de valores, cada comunidade desenvolve uma consciência e um conhecimento da necessidade de preservar os bens culturais construídos, pois eles são portadores dos seus próprios valores patrimoniais comuns [31].

Deste modo, conclui-se que a identificação de um monumento como património é uma forma de realçar os seus valores e mostrar a uma comunidade o significado dessa obra. Funciona como forma de afirmação de um grupo, de uma comunidade, de uma região ou até de um país, preservando as memórias colectivas. E para que essas memórias não caiam em esquecimento torna-se necessário realizar intervenções de preservação de forma correcta.

2.2 A evolução histórica da conservação

Os monumentos chegam até aos nossos dias como testemunhos vivos das tradições de várias gerações ao longo dos séculos e por isso foram valorizados pelas civilizações que se tornaram mais conscientes dos valores que os monumentos transmitem considerando-os como parte do património. Assim existe cada vez mais na consciência de que é necessário preservar esse património para que passe de geração em geração com toda a sua autenticidade

Durante um processo de conservação, restauro e reabilitação de edifícios existem divergências entre as diferentes entidades que de algum modo participam nessa intervenção.

Estas divergências existem devido ao facto de o conceito de conservação não ser uma ciência exacta, mas sim o resultado de uma visão de opiniões, que dependem do observador. O observador irá sugerir uma solução de intervenção tendo em conta os seus conhecimentos, entendimento e interpretação dos conceitos que por ser um processo pessoal poderá não ser consensual [2].

Devido ao facto do património assumir uma importância cultural elevada em Portugal torna-se fundamental que as intervenções de conservação sejam realizadas por especialistas formados neste âmbito e que realizem as escolhas técnicas mais indicadas, de modo a garantir que no resultado final o património mantenha as características que representam a história [9].

Com a finalidade de regular estas intervenções e garantir uma base comum a todos os intervenientes, ao longo dos séculos surgiram Cartas, Convenções e recomendações onde se definem conceitos e princípios de orientação.

A Carta de Atenas surgiu durante a Conferência Internacional de Atenas sobre o Restauro dos Monumentos, realizada entre 21 e 30 de Outubro de 1931 em Atenas, e realça a importância do conceito de conservação e a valorização e durabilidade dos monumentos e daqui realçam-se os seguintes aspectos [2, 13]:

- Deve-se manter a ocupação dos monumentos, para que se assegure a continuidade da sua vida, desde que as utilizações que respeitem o seu carácter histórico ou artístico;
- Respeito na construção dos edifícios, pelo carácter e a fisionomia das cidades, sobretudo na vizinhança de monumentos antigos cuja envolvente deve ser objecto de cuidados particulares;
- Aprova-se a utilização, de forma sensata, de materiais e técnicas modernas, a fim de não alterar o aspecto e o carácter do edifício;
- Recorrer a especialistas das áreas de Química, Física e Biologia para compreender as ameaças dos agentes atmosféricos na degradação dos monumentos;
- No caso de ruínas deve-se, sempre que possível, recolocar no lugar os elementos exactos originais encontrados ou colocar novos materiais com características que os tornem identificáveis;
- Antes de se proceder ao restauro de um monumento deve-se realizar uma análise escrupulosa das patologias desses monumentos.

A carta de Atenas contribui para o desenvolvimento de um amplo movimento internacional, que se materializou em documentos nacionais, no trabalho do ICOM e da UNESCO e, por

Capítulo 2. Conservação de edifícios históricos

fim, na criação de um Centro Internacional para o Estudo da Preservação e Restauro dos Bens Culturais. O desenvolvimento da investigação crítica visou enfrentar problemas gradualmente mais complexos e diversificados. Por tal, sentiu-se a necessidade de actualizar a carta de Atenas, de modo a definir melhor os princípios envolvidos e ampliar o seu âmbito num novo documento.

Assim, no 2º Congresso Internacional de Arquitectos e Técnicos de Monumentos Históricos, realizado em Veneza de 25 a 31 de Maio de 1964, foi aprovado um texto composto por 16 artigos e denominado por Carta de Veneza. Destacam-se as seguintes ideias [2, 36]:

- Um monumento histórico não é apenas uma criação arquitectónica isolada, podendo ser considerado como monumento histórico os sítios urbanos ou rurais nos quais sejam patentes os testemunhos de uma civilização em particular, de uma fase significativa da evolução, ou de algum acontecimento histórico;
- Não são apenas as grandes criações consideradas como monumentos, existem pequenas criações que devido ao seu significado cultural ao longo dos anos também são consideradas como monumentos;
- Um monumento é inseparável da história de que é testemunho e do meio em que está inserido;
- No processo de conservação e restauro de monumentos deve-se recorrer à colaboração entre os conceitos científicos e os conceitos técnicos que contribuam para a protecção do património;
- A conservação e o restauro têm como objectivo salvaguardar a obra de arte e as respectivas evidências históricas;
- Para a conservação dos monumentos é necessário que estes sejam sujeitos a operações de manutenção, devendo ser essas operações alargadas para o espaço envolvente;
- Durante um restauro deve-se preservar os valores estéticos e históricos do monumento, devendo ser baseado no respeito pelos materiais originais;
- As contribuições de todas as épocas que o monumento passou devem ser respeitadas;
- Os elementos destinados a substituírem partes que falem devem integrar-se no conjunto de forma imperceptível;

- Os trabalhos de reconstrução devem ser rejeitados, excepto no caso de *anastylosis*, ou seja, apenas é permitida remontagem de peças soltas que existam num estado de desagregação.

No ano de 1972, A Conferência Geral da Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura, constatou que o património cultural e natural está cada vez mais ameaçado, não apenas pelas causas tradicionais de degradação, mas também pela evolução da vida social e económica que promove o agravamento da degradação através de fenómenos de alteração ainda mais complexos. Considerando que determinados bens do património cultural e natural revestem-se de excepcional interesse, é necessário a sua preservação e que torna-se indispensável, para tal efeito, de novas disposições convencionais que estabeleçam um sistema eficaz de protecção colectiva do património cultural e natural, organizado de modo permanente e segundo métodos científicos e modernos [2].

Ao longo dos anos realizaram-se várias convenções, onde surgiram novas cartas e recomendações, todas elas com o intuito de proteger e preservar o património.

Já em 2000, em Cracóvia, foi redigida uma nova carta que actua no espírito da carta de Veneza, mas que procura atender à nova dinâmica cultural existente na Europa. Com a evolução das cidades e das civilizações, a Europa caracteriza-se pela diversidade cultural pela pluralidade de valores fundamentais associados ao património móvel, imóvel e intelectual, o que implica diferentes significados que originam conflitos de interesses. Deste modo durante a salvaguarda do património cultural deve-se dar uma maior atenção aos problemas e às decisões adoptadas.

São de destacar, desta nova carta, os seguintes pontos [2, 18]:

- A conservação pode ser realizada mediante diferentes tipos de intervenções, tais como o controlo do meio ambiental, a manutenção, a reparação, o restauro, a renovação e a reabilitação;
- A manutenção e a reparação constituem uma parte fundamental no processo de conservação do património;
- Devem ser tomadas medidas preventivas, através da realização de relatórios onde se avaliam os riscos de degradação do património;
- Num projecto de restauro, devem participar todas as disciplinas pertinentes e a coordenação deve ser levada a cabo por uma pessoa qualificada na área de conservação e restauro;
- As técnicas de conservação devem estar ligadas à investigação pluridisciplinar sobre materiais e tecnologias usadas na construção, reparação e no restauro do património edificado;

Capítulo 2. Conservação de edifícios históricos

- A intervenção escolhida deve respeitar a função original e assegurar a compatibilidade com os materiais, as estruturas e os valores arquitectónicos existentes.

Após a Carta de Cracóvia, realizaram-se mais convenções, cartas e orientações, todas elas com o intuito de acentuar a importância do património e a necessidade de o conservar e salvaguardar das ameaças de degradação e destruição. É necessário que este trabalho continue de modo a que o património chegue às gerações futuras e lhes passe a história dos seus antepassados.

Capítulo 3

Humidade e temperatura

3.1 Conceito de humidade

Uma das causas que pode originar patologias num edifício ou monumento é a ocorrência de humidade. Devido ao seu grau de complexidade este parâmetro é avaliado através de processos que quantificam o estado hidrotérmico do ar, tais como humidade absoluta, concentração de vapor de água, pressão de vapor de água, humidade relativa e temperatura do ponto de orvalho.

3.1.1 Equação dos gases perfeitos

O ar húmido é uma mistura de gases, em que 21% é oxigénio, 78% azoto e 1% de outros gases e vapor de água.

Um gás perfeito é um gás de referência em que as moléculas não exercem forças entre si. A seguinte equação é a que caracteriza um gás ideal

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.1)$$

Sendo p a pressão, V o volume, n o número de moles, R a constante universal dos gases ($8,3169 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e T a temperatura absoluta em graus Kelvin.

Se um determinado gás for considerado um gás perfeito e sabendo que $n = m_x/M_x$, em que m_x é a massa e M_x a massa molar a equação dos gases perfeitos é dada por,

$$p_x \cdot V = m_x \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

onde p_x é a pressão parcial e m_x a massa actual. [9]

3.1.2 Pressão parcial de vapor de água

Quando ocorre evaporação de moléculas de água a pressão aumenta até um determinado limite, tendendo-se para que o número de moléculas que evaporam iguale o número de moléculas que retornam a partir da atmosfera, estabelecendo-se um equilíbrio dinâmico entre a evaporação e a condensação. Esta condição limite depende apenas na pressão do ar seco e encontra-se de acordo com a lei de independência das pressões parciais, também conhecida como a lei de *Dalton*. A lei de *Dalton* diz que o comportamento de qualquer gás numa mistura mecânica não depende da presença de outros gases e que a pressão total é igual á soma das pressões parciais [9].

Em condições correntes existe sempre uma determinada quantidade de vapor de água no ar, que se traduz na humidade absoluta e na concentração de vapor de água. A pressão parcial de vapor de água, P_v , define-se pela pressão que esse vapor teria se ocupa-se sozinho o volume ocupado pela respectiva massa de ar e é determinado através da seguinte fórmula:

$$P_v = 461,4 \cdot (t + 273,15) \cdot v \quad (3.3)$$

onde t a temperatura e v a concentração de vapor de água. É de salientar que o vapor de água exerce uma pressão que aumenta com o aumento da quantidade de vapor de água existente no ar, ou seja, a pressão parcial de vapor de água aumenta com o aumento da concentração de vapor de água.

A pressão de saturação é calculada por meio da fórmula empírica atribuída por Magnus e Tetens:

$$P_{V,sat} = P_{V,sat(0)} \times 10^{\frac{at}{b+t}} \quad (3.4)$$

em que $P_{V,sat(0)} = 611 \text{ Pa}$, $a = 7,5$ e $b = 273,3^\circ\text{C}$, ou seja:

$$P_{V,sat} = 611 \times 10^{\frac{7,5t}{273,3+t}} \quad (3.5)$$

No caso de existir gelo a pressão de saturação deve ser calculada com $a = 7,5$ e $b = 265,5^\circ\text{C}$. Esta equação origina valores aceitáveis para temperaturas atmosféricas correntes, mas para temperaturas mais elevadas os valores deixam de ser tão aceitáveis [19].

3.1.3 Relação entre mistura de ar seco e vapor de água

A proporção da mistura de ar húmido, ou seja, vapor de água e ar seco é obtida através do quociente entre a massa de vapor de água e massa de ar seco, como se pode observar na seguinte fórmula

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (3.6)$$

onde m_v é a massa de vapor de água e m_a a massa de ar seco.

Considerando a equação (3.2) e determinando a pressão parcial de ar seco, P_a , através da seguinte expressão:

$$P_a = \rho - P_v \quad (3.7)$$

onde ρ é a pressão atmosférica e P_v a pressão parcial de ar seco. Para $\rho = 1000 \text{ Pa}$, a relação entre a mistura de ar seco e vapor de água é dada da seguinte forma,

$$w = \frac{\frac{P_v \cdot V}{R_v \cdot T}}{\frac{P_a \cdot V}{R_a \cdot T}} = \frac{R_a}{R_v} \cdot \frac{P_v}{\rho - P_v} = 0,622 \times \frac{P_v}{\rho} \quad (3.8)$$

O parâmetro w é adimensional e representa as gramas de vapor de água misturadas por cada grama de ar seco. Como é um valor muito pequeno pode ser apresentado em % ou pode-se multiplicar por 1000 e representar-se g/kg, ou seja, representa as gramas de vapor de água misturadas por cada quilograma de ar seco. É independente da temperatura, do volume e da pressão atmosférica da parcela de ar, pelo que se mantém constante em caso de ocorrer condensação, evaporação ou mistura com outras massas.

Para uma dada temperatura, w aumenta directamente com a massa de vapor emitida para a atmosfera até atingir o limite de saturação, ou seja, até a concentração de vapor de água igualar-se à concentração de vapor de água saturada ou a pressão de vapor de água igualar-se à pressão de vapor de água saturada. Logo,

$$w_{sat} = 0,622 \times \frac{P_{v,sat}}{\rho} \quad (3.9)$$

Calculando w_{sat} e medindo a humidade relativa é possível determinar w através da seguinte relação [9]:

$$w = H_r \times w_{sat} \quad (3.10)$$

3.1.4 Humidade absoluta

Humidade absoluta, H_a , é a relação entre a massa de vapor de água e a massa de ar húmido. Representa a diluição ponderada do vapor de água presente na atmosfera, isto é, representa a quantidade de vapor de água que existe no ar e é dada por

$$H_a = \frac{m_v}{m_a + m_v} \quad (3.11)$$

Tendo em conta a relação entre ar seco e o vapor de água dada pela equação (3.6), a humidade absoluta pode ser apresentada da seguinte maneira

$$H_a = 0,622 \times \frac{P_v}{\rho} \quad (3.12)$$

Este parâmetro é adimensional, geralmente apresentado em g/g, que representa a massa de vapor de água (em gramas) contido em cada grama de ar húmido. Como se trata de um valor pequeno pode ser apresentado em kg/kg ou em %.

Tendo em conta a equação (3.9) conclui-se que

$$H_a = H_r \times L_{sat} \quad (3.13)$$

onde L_s é o limite de saturação [9].

3.1.5 Concentração de vapor de água

A concentração de vapor de água, v , pode ser definida como a massa de vapor de água contida por unidade de volume de ar húmido, como se mostra na seguinte expressão:

$$v = \frac{m_v}{V} \quad (3.14)$$

A equação dos gases ideais pode ser escrita da seguinte forma:

3.1. Conceito de humidade

$$P_v = \frac{m_v}{V} \times R_v \times T = v \times R_v \times T \quad (3.15)$$

Considerando a equação (3.15) e que a densidade do vapor de água é o inverso do volume específico, a concentração de vapor de água é dada por:

$$v = \frac{1}{V_v} = \frac{1}{R_v} \times \frac{P_v}{(273,15 + t)} \quad (3.16)$$

Para P_v obtém-se a seguinte expressão para a concentração de vapor de água:

$$v = 2,2 \times \frac{P_v}{273,15 + t} \quad (3.17)$$

Sendo P_v expresso em Pa e u em g/m³ [9].

É de salientar que existe um limite a partir do qual o ar não tem capacidade de absorver mais vapor de água designado por limite de saturação, L_{sat} [19].

Para $P_{v,sat}$ obtém-se a seguinte expressão [9]:

$$L_{sat} = 2,2 \times \frac{P_{v,sat}}{273,15 + t} \approx 0,806 \times 10^{-3} \times P_{v,sat} \quad (3.18)$$

O limite de saturação, ou seja, a concentração máxima de vapor de água que o ar pode conter, varia directamente com a temperatura. Pelo que se conclui que quando a temperatura aumenta o limite de saturação aumenta e quando a temperatura diminui o limite de saturação diminui. Após atingir este limite se tenta-se introduzir mais vapor de água este condensaria, ou seja passava para o estado liquido [19].

Conhecendo o valor da humidade relativa é possível determinar a concentração de vapor de água através da seguinte expressão [9]:

$$v = L_{sat} \times H_r \quad (3.19)$$

3.1.6 Humidade relativa

O conceito de humidade relativa traduz uma relação de grandezas que varia em função da temperatura mesmo quando a humidade absoluta ou a concentração de vapor de água são constantes. Trata-se de uma relação adimensional entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de saturação.

Capítulo 3. Humidade e temperatura

$$H_r = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (3.20)$$

Consoante se está acima ou abaixo dos 0°C os coeficientes da pressão de saturação variam, o que pode causar ambiguidades. Esta definição perde rigor quando a humidade relativa se aproxima do seu limite superior, ou seja quando se aproxima da saturação. Tal acontece devido ao facto de que perto da saturação a pressão parcial de vapor de água afasta-se das condições de “gás ideal”, devendo ser utilizado nestes casos uma propriedade que não seja afectada. Para evitar este problema pode-se reformular a definição de ρ em termos de massa de vapor de água contido nessa parcela de ar. Tendo em conta a definição de gás ideal considere-se as seguintes expressões.

$$P_v = \frac{m_v}{V} \times R_v \times T \quad (3.21)$$

$$P_{v,sat} = \frac{m_{v,sat}}{V} \times R_v \times T \quad (3.22)$$

Assim a humidade relativa pode ser definida através do quociente entre a massa de vapor de água presente num volume de ar com determinada temperatura, e a máxima quantidade de água possível para o mesmo volume e a mesma temperatura. Graficamente, esta definição representa o grau de saturação ao vapor de água.

$$H_r = \frac{m_v}{m_{v,sat}} \quad (3.23)$$

$$H_r = \frac{m_v}{m_{v,sat}} = \frac{e_v}{e_{v,sat}} = \frac{w_v}{w_{v,sat}} = \frac{\frac{mv}{ma}}{\frac{mv_{sat}}{ma}} = \frac{a_v}{a_{v,sat}} = \frac{\frac{m_v}{V}}{\frac{m_{v,sat}}{V}} \approx \frac{S_v}{S_{v,sat}} = \frac{\frac{m_v}{m_a+m_v}}{\frac{m_{v,sat}}{m_a+m_{v,sat}}} \quad (3.24)$$

Esta expressão depende da quantidade de massa de vapor de água presente no ar e da temperatura que actua de forma exponencial sobre o denominador $m_{v,sat}$. A entre a humidade relativa e a temperatura é notória através dos gráficos, visto que estes são quase simétricos.

A humidade relativa varia entre 0 e 1, mas normalmente é expressa em %.

Através das equações 3.2, 3.9 e 3.24 é possível calcular w e H_a a partir das medições de t e H_r , consegue-se obter a pressão e a concentração de vapor de água através das seguintes expressões [9]:

3.1. Conceito de humidade

$$w = H_a = \frac{3795}{\rho} \times H_r \times 10^{\frac{at}{b+t}} \approx 37,95 \times H_r \times 10^{\frac{at}{b+t}} \quad (3.25)$$

$$P_v = 611 \times H_r \times 10^{\frac{at}{b+t}} \quad (3.26)$$

$$v = \frac{1344 \times H_r \times 10^{\frac{at}{b+t}}}{273,3 + t} \quad (3.27)$$

As relações existentes entre a humidade relativa, humidade absoluta e a temperatura do ar são geralmente expressas através de um diagrama específico, designado diagrama psicométrico, que se apresenta na figura 3.1.

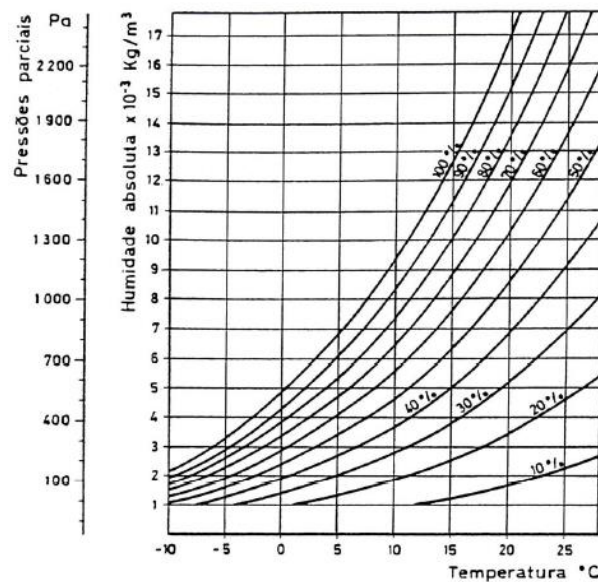


Figura 3.1 – Diagrama psicométrico [20]

Este diagrama apresenta nas abcissas os valores da temperatura e nas ordenadas o valores de humidade absoluta e de pressões parciais de vapor de água e um conjunto de curvas de humidade relativa, que permitem relacionar estes parâmetros de forma simples.

3.1.7 Temperatura do ponto de orvalho

É a temperatura do ponto de orvalho para o qual o ar atinge a saturação. Este parâmetro é influenciado pela temperatura e a humidade relativa do ar. A temperatura do ponto de orvalho, t_s , pode ser calculada com recurso à seguinte expressão [19]:

Capítulo 3. Humidade e temperatura

$$t_s = \frac{273,3 \cdot \left(\ln(H_r) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \right)}{17,269 - \left(\ln(H_r) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \right)} \quad (3.28)$$

Como simplificação pode-se considerar que:

$$\delta = \ln(H_r) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \quad (3.29)$$

E assim a expressão da temperatura do ponto de orvalho fica:

$$t_s = \frac{273,3 \cdot \delta}{17,269 - \delta} \quad (3.30)$$

Esta poderá também ser calculada em função da pressão de saturação de vapor de água através [9]:

$$t_s = \frac{273,3 \cdot \left(\ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right) \right)}{17,269 - \left(\ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right) \right)} \text{ para } P_{v,sat} \geq 611 \text{ Pa} \quad (3.31)$$

$$t_s = \frac{265,5 \cdot \left(\ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right) \right)}{21,875 - \left(\ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right) \right)} \text{ para } P_{v,sat} < 611 \text{ Pa} \quad (3.32)$$

É possível observar através das expressões de cálculo que a temperatura de saturação depende da temperatura real e da humidade relativa. Quando a temperatura real se aproxima da temperatura de saturação significa que nos encontramos próximos das condições de saturação, pelo que quanto maior for a temperatura do ponto de orvalho mais difícil é atingir as condições de saturação.

Para uma dada humidade absoluta ou concentração de vapor de água, se a temperatura real aumentar o limite de saturação aumenta. Como a humidade relativa é dada pelo quociente entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de saturação (em que ambos os termos dependem directamente da temperatura) a humidade relativa atinge um valor inferior ao valor inicial [19].

3.2 Conceito de temperatura

Temperatura é o factor que determina a direcção do fluxo de calor entre dois corpos, sendo que esse fluxo dá-se sempre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Se for colocado um termómetro num corpo e o seu valor não variar significa que a temperatura do corpo não é influenciada por outros factores.

De acordo com o princípio da equipartição da energia e do ponto de vista termodinâmico a temperatura representa a média da energia cinética das moléculas de determinado gás [9]:

$$E_c = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (3.33)$$

em que $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ é a constante de *Boltzmann* e T a temperatura também conhecida, devido a esta relação, como temperatura molecular.

A temperatura, T , é apresentada em Kelvin (K) enquanto a temperatura, t , é apresentada em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$). A expressão que mostra a relação entre as duas temperaturas é [9]:

$$t = T - 273,15 \quad (3.34)$$

em que 273,15 é a temperatura do ponto triplo da água, ou seja a temperatura para o qual os três estados de matéria coexistem em equilíbrio termodinâmico.

Embora o conceito de temperatura seja relativo a gases, este pode ser aplicado num corpo em estado sólido ou líquido utilizando-se uma definição simples em que a temperatura é a variável medida num termómetro.

Na ausência de erros o termómetro mede apenas a temperatura do seu bulbo e não necessariamente a do objecto em avaliação. Tal acontece devido ao facto de que para existir equilíbrio termodinâmico tem de existir equilíbrio entre as trocas de calor por condução, convecção e radiação, o que varia de objecto para objecto e de material para material [9].

3.2.1 Trocas de calor por condução

A condução corresponde a um fenómeno de transferência de calor entre duas superfícies que se encontrem em contacto directo e apresentem temperaturas diferentes. Pode ocorrer em sólidos e em líquidos.

Um material com uma dada temperatura apresenta um certo estado de agitação molecular que é tanto maior quanto maior for a temperatura. No caso em que duas zonas apresentam

Capítulo 3. Humidade e temperatura

temperaturas diferentes a agitação molecular transmite-se da zona que tem maior estado de agitação para a que tem menor, até ser atingido um equilíbrio entre as duas.

A transferência de calor pode ser determinada com recurso à seguinte expressão

$$q = \frac{Q}{A} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.35)$$

em que A é a área perpendicular ao sentido do fluxo através do qual ocorre a transmissão de calor, Q a quantidade de calor e q o fluxo de calor [19].

Na formulação da sua teoria analítica do calor, Fourier assume que o fluxo de calor numa dada direcção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa mesma direcção. Assumindo a condução unidireccional segundo a direcção x tem-se:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.36)$$

em que λ é o valor da condutibilidade térmica do material em análise e o sinal negativo decorre do facto de as transferências de calor ocorrerem das temperaturas mais elevadas para as mais baixas, sendo esta equação designada pela lei de Fourier. A condutibilidade térmica do material traduz a forma como o material se deixa atravessar pelo calor, podendo ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de diferença de temperatura. Deste modo um material que não se deixa atravessar facilmente pelo calor apresenta valores de condutibilidade térmica mais baixos do que os materiais que se deixam atravessar facilmente pelo calor. Desde modo, um material que não se deixa atravessar facilmente pelo calor é um bom isolante térmico [19].

3.2.2 Trocas de calor por convecção

As trocas de calor por condução implicam que as variações de temperatura das moléculas sejam realizadas através da alteração relativa do seu posicionamento. Esta alteração irá originar uma variação da massa volúmica que resulta em movimentos típicos da convecção. Este tipo de mecanismo é próprio dos fluidos, porque admite-se que a existência de movimentos são incompatíveis com os corpos sólidos.

Considerando o caso em que uma determinada parede apresenta uma temperatura maior que a temperatura ambiente, a temperatura das camadas de ar em contacto com a parede aumenta por condução, que por sua vez transmitem, também por condução, esse incremento de temperatura às camadas adjacentes. Este mecanismo irá originar um estado de agitação de moléculas maior, e por conseguinte um aumento do afastamento entre moléculas que provoca uma diminuição do número de moléculas por unidade de volume. Com a diminuição da massa volúmica, devido ao afastamento entre moléculas, o ar de maior temperatura irá

3.2. Conceito de temperatura

sofrer uma ascensão por efeito de impulsão e será substituído por ar de menor temperatura e assim sucessivamente. Estes movimentos irão originar diferenciais térmicos maiores tornando as trocas térmicas por convecção maiores que as trocas por condução.

O fluxo de calor por convecção, q_{conv} , é dado pela lei do arrefecimento de Newton:

$$q_{conv} = h_c \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.37)$$

em que T_1 é a temperatura da superfície, T_2 a temperatura do ambiente e h_c é a condutância térmica superficial por convecção.

A condutância térmica superficial por convecção não é específica do fluido em causa e depende da geometria da superfície, da natureza do fluido e do tipo de movimento existente. Este último factor é extremamente importante pois permite dividir a convecção em dois tipos com características diferentes: convecção natural quando os movimentos decorrem essencialmente das características de massa volúmica do fluido devido as variações de temperatura, e convecção forçada quando o movimento do fluido é exterior e independente das variações de temperatura.

A convecção natural é um fenómeno que interessa preferencialmente aos ambientes interiores dos edifícios, aqueles em que a velocidade do ar é suficiente baixa para poder ser desprezada, bem como todas as situações de espaços de ar não-ventilados no interior de elementos de construção.

A condutância térmica superficial por convecção não é específica do fluido em causa e depende da geometria da superfície, da natureza do fluido e do tipo de movimento existente. Este último factor é extremamente importante pois permite dividir a convecção em dois tipos com características diferentes: convecção natural e convecção forçada.

A convecção natural ocorre quando os movimentos resultam essencialmente das características da massa volúmica do fluido devido às variações de temperatura. Este tipo de fenómeno é importante em ambientes interiores dos edifícios ou situações de espaços de ar não-ventilados no interior de elementos de construção, porque são locais em que a velocidade do ar é suficientemente baixa o que não permite desprezar estes movimentos.

Nestas condições, verifica-se que os movimentos que o ar pode assumir resultam do seu aquecimento diferenciado, resultando numa variação espacial da massa volúmica que origina movimentos ascendentes do ar mais quente (com menor massa volúmica) e movimentos descendentes do ar mais frio (com maior massa volúmica).

Tendo em conta o tipo de mecanismos que ocorrem na convecção natural, conclui-se que as transferências de calor que ocorrem desta forma são dadas em função da geometria e da orientação das superfícies.

A convecção forçada ocorre quando o movimento do fluido é provocado por uma componente exterior, não dependendo das variações de temperatura [19].

3.2.3 Trocas de calor por radiação

Todos os corpos emitem radiação electromagnética, que encontra condições preferenciais de transmissão através de misturas gasosas ou de sólidos semi-transparentes, nos quais a absorção é fraca.

A radiação propaga-se à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), possuindo como características próprias uma determinada frequência, f , e comprimento de onda, λ , relacionados de acordo com a seguinte expressão:

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.38)$$

A propagação da radiação, e , pode ser analisada em termos de teoria quântica, segundo a qual a interacção da radiação com a matéria é feita sob a forma de quanta ou fótons, que possuem energia quantificável através da expressão seguinte:

$$e = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.39)$$

em que $h = 6,635 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ é a constante de *Planck*.

O valor máximo de energia emitida por um corpo à temperatura absoluta, T , pode ser obtido através da lei de *Stefan-Boltzman*:

$$Q_{max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3.40)$$

em que A é a área e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ a constante de *Stefan-Boltzman* com valor absoluto de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Esse valor máximo de energia emitida é relativo à energia emitida por uma abstracção física designada de corpo negro. A radiação emitida pelos corpos reais é inferior à definida anteriormente, na medida em que uma determinada superfície emite sempre uma quantidade de energia inferior à que emitiria um corpo negro que estivesse à mesma temperatura. A relação entre a energia efectivamente emitida por uma superfície e o valor máximo correspondente à emissão do corpo negro denomina-se emissividade, ε . Esta relação pode ser considerada como uma medida da eficiência de um corpo emitir energia, em comparação com um corpo negro. A maior parte dos materiais de construção apresentam uma emissividade na ordem dos 0,8, sendo o valor máximo 1.

Assim, a energia emitida por um corpo real pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$Q_{max} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3.41)$$

3.2. Conceito de temperatura

No caso em que uma determinada superfície está completamente envolvida por outra bastante maior, cujas temperaturas sejam respectivamente T_s e T_{env} , as transferências de calor por radiação podem ser determinadas através da seguinte expressão:

$$Q_{max} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{env}^4) \quad (3.42)$$

Em condições correntes, a transmissão de calor nas circunstâncias referidas ocorrerá não só por radiação, mas também por convecção. Nestes casos as quantidades de energias transferidas podem ser obtidas com recurso à seguinte expressão:

$$Q_{max} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{env}) \quad (3.43)$$

Onde h é a condutância térmica superficial média para a radiação e convecção. Trata-se de uma simplificação que facilita o cálculo das transferências de calor por radiação e por convecção. Os efeitos da radiação são significativos e influenciam bastante na determinação da condutância nos casos de convecção natural, mas são praticamente irrelevantes e quase sempre ignorados nos casos de convecção forçada [19].

Capítulo 4

Temperatura e humidade em edifícios

4.1 Temperatura em edifícios

A temperatura é dos parâmetros que se deve ter em conta para a correcta conservação de um edifício, pois as variações deste parâmetro podem provocar danos nos materiais construtivos e nos elementos que se encontram no seu interior. Ao longo de um edifício existem variações de temperatura que podem ser causadas devido ao clima exterior, as soluções construtivas adoptadas e à arquitectura do edifício.

A influência das forças externas (radiação solar, condução de calor externo através do telhado e paredes exteriores e as trocas de calor através de aberturas) num edifício dependem da arquitectura e da escolha dos materiais utilizados.

O facto de uma parede apresentar pequena espessura ou ser composta por materiais com elevados coeficientes de condutibilidade térmica torna com que seja mais sensível às variações térmicas existentes num ciclo diário de temperatura. No caso de um compartimento se encontrar em contacto com a cobertura também origina com que seja mais sensível aos ciclos diários visto que ganham radiação solar durante o dia e perdem radiação infravermelha à durante a noite. Em contrapartida, situações em que o edifício está sujeito a condições estáveis os compartimentos apresentam variações de temperatura reduzidas, como é o caso de compartimentos interiores em pisos térreos devido ao facto de o solo apresentar uma elevada capacidade de reservar o calor que equilibra o balanço. Em compartimentos sujeitos a sistemas de climatização ou presença de pessoas o equilíbrio natural do microclima é totalmente alterado. Conclui-se que exposições diferentes num edifício conduzem a que nem todos os compartimentos apresentem a mesma temperatura.

Como o ar é móvel e contém uma pequena parcela de calor, a temperatura interior é determinada pelas trocas de calor entre piso, tecto, paredes, janelas, portas e outras fontes dissipadoras de calor, como por exemplo, os aquecedores, ar condicionado, lâmpadas, pessoas e outros. Num compartimento fechado a distribuição espacial do ar depende da sua densidade, isto é, o ar de maior temperatura (menor densidade) encontra-se na zona superior e o ar de menor temperatura (maior densidade) localiza-se na zona inferior, formando-se uma estratificação do ar por temperaturas. No entanto, se existir alguma fonte dissipadora de calor,

se ocorrer a entrada de ar frio por aberturas localizadas nas zonas superiores ou se as superfícies não se encontrarem à mesma temperatura deixa de ocorrer a estratificação por temperaturas passando a existir correntes convectivas. Um outro caso em que se verifica a ocorrência de correntes convectivas é durante o Inverno, em que a cobertura se encontra fria devido à temperatura exterior provocando o arrefecimento e o aumento de densidade do ar junto do topo, o que origina com que este desça.

Geralmente os edifícios históricos apresentam paredes com elevada espessura, que lhes confere a capacidade de reter uma grande quantidade de calor, e por conseguinte manter o equilíbrio e uma estratificação térmica constante, excepto quando existem elementos perturbadores, como por exemplo, sistemas de climatização, iluminação, pessoas. As paredes de grande espessura são bastante eficazes no amortecimento dos ciclos de temperatura, tanto diários como sazonais (menor eficácia neste caso), contribuindo para um microclima estável.

Por exemplo, no caso das igrejas a cobertura segue as variações sazonais com um pequeno desfasamento devido à sua reduzida resistência térmica, enquanto o pavimento do piso térreo apresenta um desfasamento maior. Deste modo no Verão o ar junto da cobertura apresenta uma temperatura maior do que o ar junto do pavimento, enquanto que durante o Inverno a cobertura se encontra mais fria do que o pavimento.

No Verão a cobertura apresente uma temperatura mais elevada do que o pavimento, logo ao serem geradas trocas de calor entre estas duas superfícies e o ar interior conclui-se que o ar mais quente será o que se encontra junto à cobertura e o ar mais frio será o que se encontra junto ao pavimento, existindo deste modo uma estratificação do ar por temperaturas.

No Inverno a cobertura apresenta uma temperatura mais baixa do que o pavimento. Neste caso, ao serem geradas trocas de calor entre estas duas e o ar interior conclui-se que o ar mais frio se localiza junto da cobertura enquanto o mais quente se localiza junto do pavimento. Como o ar mais quente tem uma densidade menor vai subir até à cobertura onde irá arrefecer e aumentar de densidade depois de entrar em contacto com a cobertura, e descendo novamente até ao pavimento, pelo que se geram correntes convectivas que impedem a estratificação do ar por temperaturas [9,34].

4.2 Humidade em edifícios

A humidade é uma das principais causas de patologias em edifícios, afectando a durabilidade, o aspecto dos elementos construtivos, o conforto dos utentes e até a saúde e a segurança.

São várias as formas sob as quais as anomalias devido à presença de humidade podem manifestar-se e devem-se a vários factores, tais como a orientação do edifício, as condições climáticas, método construtivo e os materiais de construção utilizados. Note-se que um edifício localizado numa zona onde existem linhas de água apresenta uma grande probabilidade de aparecimento de humidade devido à ascensão capilar através dos materiais de construção, tal como um edifício localizado numa zona caracterizada por invernos frios e húmidos contribui para o aparecimento de patologias devido à presença de água, tanto em fase líquida como em fase de vapor.

Note-se que uma construção que apresente elevada inércia térmica, como é o caso de construções antigas, ou que não tenha sido aplicado isolamento térmico associado à fraca renovação do ar irá provocar um ambiente interior muito frio e humidades relativas muito altas.

Os materiais utilizados na construção de um edifício são bastante importantes pois dependendo das suas características podem permitir mais facilmente absorção e a adsorção de água [35].

4.2.1 Mecanismos fundamentais de transferência de humidade

Os fenómenos de transferência de humidade numa parede podem ocorrer durante a fase de vapor ou em fase líquida. Na fase de vapor a transferência de humidade dá-se através dos processos de difusão e convecção. Na fase líquida a capilaridade, a gravidade e o efeito dos gradientes de pressão externas comandam a transferência de humidade.

A fixação de humidade pode acontecer através de absorção, adsorção, condensação e capilaridade [18].

4.2.1.1 Absorção e adsorção

Os materiais correntemente usados na construção são higroscópicos, isto é, quando são colocados num ambiente em que a humidade relativa varia o seu teor de humidade também se altera [1].

Com o aumento do teor de água é possível distinguir duas zonas: a de domínio higroscópico (Adsorção) e a de domínio capilar (Absorção). O ponto de intersecção teórico destas duas regiões denomina-se teor de água crítico.

A absorção é um fenómeno que ocorre acima dos 95% de humidade relativa e portanto situa-se na região capilar onde a difusão de humidade ocorre por difusão de água na sua forma líquida. A absorção implica a incorporação do volume de uma dada amostra por parte de outra substância, como por exemplo a água.

Através da figura 4.1 observa-se que a humidade relativa apresenta um declive bastante elevado encontrando-se bastante próxima da saturação total do material. Entre os 95% e os 98% de humidade relativa, denominada de região sobre-higroscópica, ocorre saturação parcial dos poros, existindo pequenas bolsas de ar no interior dos mesmos. Entre os 98% e 100% de humidade relativa, designada de região super-saturação, ocorre a saturação total do material.

A adsorção ocorre entre os 0% e os 95% de humidade relativa, pertencendo ao domínio higroscópico onde a transferência de humidade ocorre através de difusão gasosa. O processo de adsorção refere-se à retenção superficial ou adesão de moléculas de água na superfície dos poros dos materiais. É uma consequência da energia superficial dos materiais, ocorrendo devido a interações electrostáticas entre moléculas dos materiais envolventes no processo. O processo inverso designa-se por desadsorção [19,14].

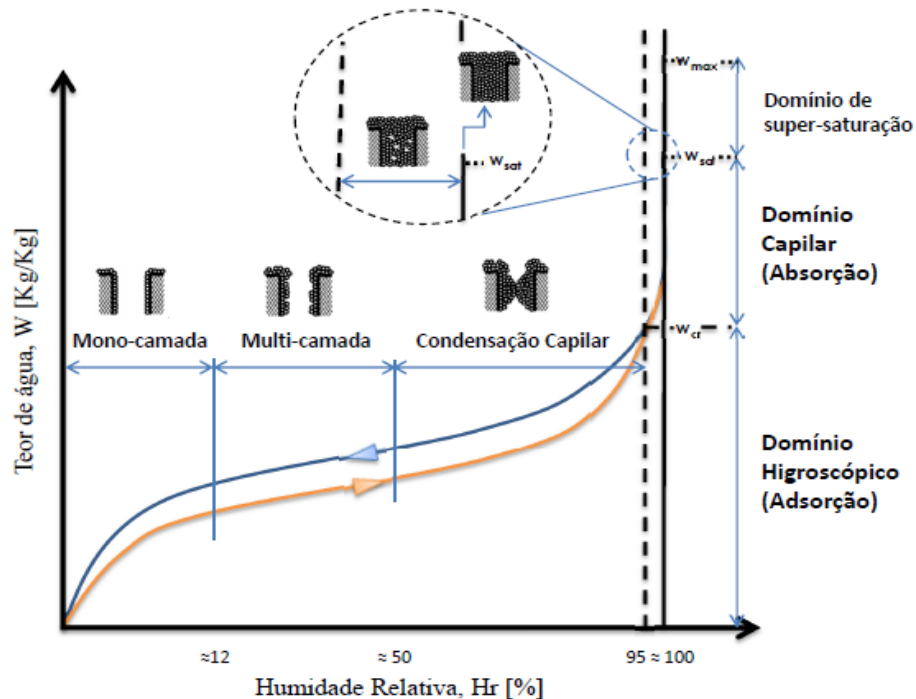


Figura 4.1 – Curva de adsorção e desadsorção [14]

Pela figura 4.1 é possível verificar a existência de três zonas distintas, a fase de adsorção mono-molecular, a fase de adsorção multi-molecular e a fase de condensação capilar.

Na fase de adsorção mono-molecular a humidade relativa encontra-se entre os 0% e aproximadamente 12% e é caracterizada pela adesão de uma fina camada de moléculas de água às paredes dos poros do material. Aproximadamente entre os valores de 12% e 50% de humidade relativa existe a fase de adsorção multi-molecular. Nesta fase existe a deposição de várias camadas de moléculas de água sobre o a camada anterior. Após 50% de humidade relativa existe a fase de condensação capilar, caracterizada pela união entre multicamadas de paredes opostas dos poros, dando origem à formação de meniscos.

No processo de adsorção existe um aumento do teor de água nos poros devido a um aumento de humidade relativa, enquanto no processo de desadsorção existe uma diminuição do teor de água nos poros devido a uma diminuição da humidade relativa [14].

Os gráficos destes dois processos deveriam ser coincidentes, mas tal não se verifica podendo-se observar isso na Figura 4.2 [4].

O facto de não existir essa coincidência deve-se ao efeito de histerese. A razão para a existência de histerese ainda não se encontra bem definido, mas admite-se que deverá resultar da estrutura porosa dos materiais, mais concretamente da porometria e da morfologia dos poros, assim como o processo de desadsorção ser mais lento que o processo de adsorção [14,19].

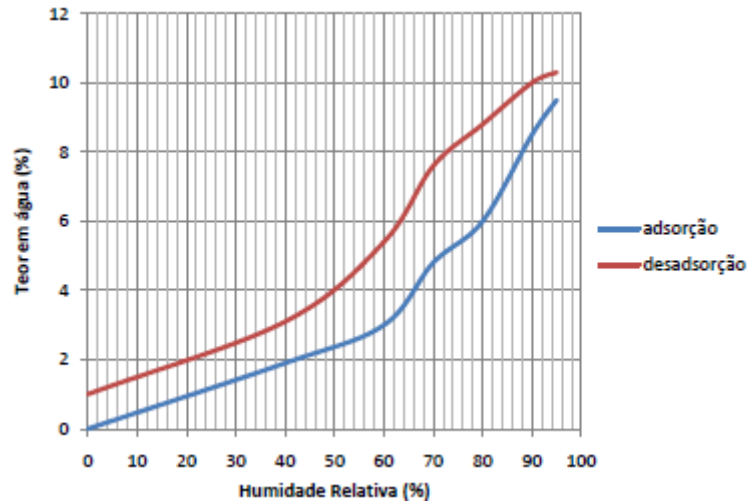


Figura 4.2 – Curva de adsorção e desadsorção; efeito de histerese (pedra calcária) [4]

4.2.1.2 Condensações

4.2.1.2.1 Condensações superficiais

O arrefecimento de uma massa provoca condensações de vapor de água sempre que se atinge o limite de saturação correspondente a uma dada temperatura.

No caso de uma edificação o arrefecimento ocorre de forma localizada junto dos paramentos das paredes exteriores, em particular nas zonas de pontes térmicas. No Inverno as faces interiores das paredes exteriores encontram-se a uma temperatura inferior à do ar ambiente. A temperatura superficial, θ_i , pode ser calculada através a seguinte expressão [20]:

$$T_{si} = t_i - \frac{1}{h_i} \times U \times (T_i - T_e) \quad 4.1$$

em que U é coeficiente de transmissão térmica da parede, T_i e T_e as temperaturas interior e a exterior, respectivamente, e $1/h_i$ a resistência térmica superficial interior para a qual, normalmente, se utiliza um valor tabelado de $0,13 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$.

O facto de a temperatura superficial das paredes ser menor do que a temperatura do ar ambiente origina aumento da humidade relativa da camada de ar que se encontra em contacto com elas, podendo provocar condensações. A análise da equação (4.1) permite compreender que para uma dada gama de temperaturas do ar exterior e interior, quanto maior o isolamento térmico da parede mais elevada será a temperatura superficial interior e, conseqüentemente, menor será o risco de ocorrência de condensações.

As condensações existem inicialmente em zonas de isolamento térmico menor, no caso de paredes heterogéneas a elementos estruturais, parapeitos, e outros. Numa fase posterior

poder-se-ão estender a zonas de superfície corrente, se o isolamento térmico destas não for suficiente ou se a ventilação dos locais for fraca ou inexistente.

Além da melhoria do isolamento térmico existem outros factores que podem diminuir a ocorrência de condensações, tais como aumentar a temperatura do ar interior para que a temperatura superficial interior da parede aumente, e diminuir a humidade relativa no interior através da melhoria da ventilação que expulsa o excesso de vapor de água existente no interior da edificação.

O acréscimo de teor de água nos materiais, existente através dos processos de adsorção e ascensão capilar, torna-se importante e deve ter sido em consideração pois diminui a resistência térmica dos materiais conduzindo a uma diminuição da temperatura acelerando o processo de condensação [20].

4.2.1.2.2 Condensações superficiais em edifícios com elevada inércia térmica

A inércia térmica de um edifício traduz a capacidade de um elemento construtivo de contrariar as variações de temperatura no seu interior, devido ao facto de armazenar calor dentro da estrutura da edificação. Este fenómeno engloba simultaneamente a acumulação de calor e a sua libertação para o ambiente interior através dos mecanismos de transferência de convecção e radiação podendo demorar horas, dias ou semanas. Este processo depende de dois conceitos: o atraso térmico e o amortecimento.

O atraso térmico corresponde ao tempo que decorre até o calor absorvido no exterior alcançar a face interior da envolvente. Já o amortecimento consiste na amenização dos picos de temperatura interior, ou seja é a capacidade da envolvente diminuir a amplitude das variações térmicas. Na figura 4.3 encontra-se representado o efeito do da inércia térmica [35,6].

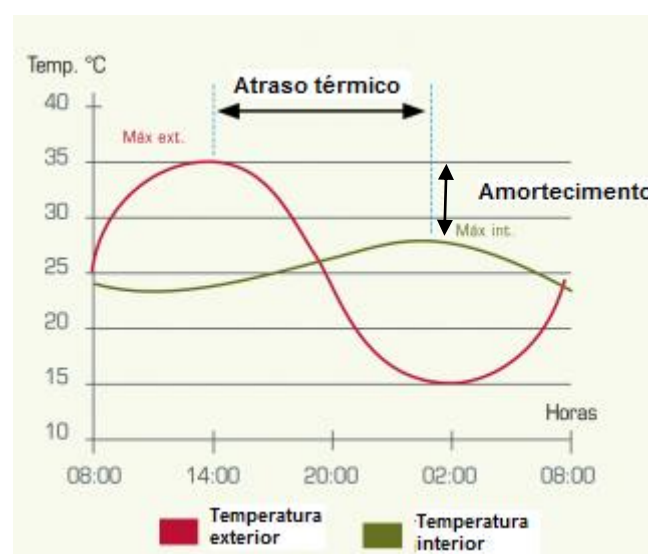


Figura 4.3 – Efeito da inércia térmica [alterado de 22]

Em climas com uma reduzida amplitude da temperatura do ar exterior, a alteração da massa térmica não tem um efeito significativo na distribuição da temperatura interior, enquanto que para climas em que existe grande amplitude térmica no exterior o aumento da massa térmica, através da aplicação de materiais com elevada densidade, resulta numa diminuição da amplitude térmica no interior [16].

Em edifícios com inércia térmica muito elevada, como os edifícios antigos com paredes de grande espessura, existe um grande desfasamento entre a temperatura do ar interior e a do ar exterior. Deste modo, as variações de temperatura verificadas no exterior destas construções não correspondem às que se verificam no interior, devido ao facto de as paredes retardarem a transmissão das solicitações térmicas exteriores ao ambiente interior. É por essa razão que esses edifícios apresentam uma temperatura ambiente interior maior no Inverno e menor no Verão [20,34,35].

Quando a temperatura exterior começa a aumentar na Primavera é frequente a ocorrência de condensações superficiais independentemente da produção do vapor existente. Tal acontece devido ao facto de o acréscimo de temperatura exterior não ser acompanhado no interior do edifício, onde a temperatura ambiente e nas paredes mantêm-se constante originando uma elevada diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício. Este acréscimo de temperatura exterior é geralmente acompanhado pelo aumento da humidade absoluta. Durante a ventilação das edificações, o ar quente e húmido é conduzido para o interior dos edifícios e aí será arrefecido atingindo valores muito baixos junto às paredes e ao pavimento. Essa diminuição de temperatura provoca um aumento da humidade relativa, que pode atingir o limite de saturação junto às paredes e por conseguinte originar condensações. Esta ocorrência de condensação poderá ser agravada se existir produção de vapor de água no interior do edifício.

Este tipo de fenómenos também pode ser observado em edifícios com inércia térmica menor em dias de grande humidade em que o ar exterior tenha um aumento brusco de temperatura [20,34].

4.2.1.2.3 Condensações internas

As condensações no interior das paredes ocorrem sempre que num dado ponto a pressão parcial do vapor de água que atravessa a parede por difusão é igual à pressão de saturação correspondente a temperatura nesse ponto.

Considerando as condições termo-higrométricas dos ambientes exterior e interior constantes, os factores que influenciam este tipo de condensações são as características do isolamento térmico e dos vários materiais que constituem as paredes, que condicionam as temperaturas no interior e determinam os valores da pressão de saturação em cada ponto, e as características de permeabilidade ao vapor de água daqueles materiais, que determinam as variações da pressão parcial ao longo da parede.

A localização das diferentes camadas numa parede heterogénea influencia decisivamente o risco de ocorrência de condensações internas devido ao facto de as características de permeabilidade das várias camadas variar.

Geralmente, as condensações de vapor de água no interior não dão origem a distúrbios visíveis mas podem provocar o apodrecimento de materiais orgânicos e o destaque de materiais, ou condensações superficiais devido ao facto de a possível absorção de água condensada originar uma diminuição da resistência térmica desses materiais conduzindo a uma diminuição da temperatura superficial [20].

4.2.1.3 Capilaridade

Quando a água se encontra em estado líquido e em contacto com um material poroso, penetra e percorre a rede capilar do material.

A absorção capilar de um líquido por um material poroso vai depender não só da sua microestrutura (quantidade, disposição e tamanho dos poros) como também de três propriedades características do líquido, que são a tensão superficial, a viscosidade e a densidade.

O transporte de água líquida no interior de materiais porosos dá-se essencialmente por capilaridade (Figura 4.4). A Capilaridade é uma força que se cria quando um líquido entra em contacto com uma superfície sólida, com a formação de duas forças de sentidos contrários: a força de adesão e a força de coesão.



Figura 4.4 – Fenómeno da capilaridade [5]

A força de adesão resulta da atração das moléculas do líquido pelas moléculas do sólido. A força de coesão resulta da coesão do próprio líquido que atua no sentido contrário. As moléculas da superfície livre do líquido estão sujeitas à resultante dessas duas forças.

Quando a adesão for superior à coesão forma-se um menisco côncavo e o líquido molha o sólido. O ângulo de contacto formado entre a superfície do líquido e a superfície do sólido é menor que 90° e no caso de um tubo capilar vertical, a pressão capilar opõe-se à gravidade induzindo assim o movimento da água para o interior do tubo.

Pelo contrário, quando a coesão for superior à adesão forma-se um menisco convexo e o líquido já não molha o sólido uma vez que o ângulo de contato é superior a 90° [5].

Capítulo 5

Microclima, processos de degradação e condições ideais para conservação

5.1 Microclima

Microclima é um termo que pode ser dividido num prefixo e numa palavra: micro e clima. O prefixo micro refere-se a um ambiente que é necessário estudar, a fim de conhecer os factores que têm uma influência directa sobre o estado físico do monumento e as interações com o ar e os objectivos circundantes. A palavra clima apresenta várias definições: clima é a síntese das condições atmosféricas do dia-a-dia em uma determinada área, clima é a descrição estatística de tempo e condições atmosféricas exibido pelos padrões de tais condições, em uma dada região, ao longo de um determinado período de tempo longo o suficiente para ser representativo, clima é o agregado flutuante de condições atmosféricas caracterizado pelos estados e desenvolvimentos de tempo em uma determinada área [9].

Com a adaptação das definições anteriores para a aplicação pretendida pode-se definir microclima como a síntese das condições físicas ambientais (como as distribuições espaciais da temperatura e humidade relativa no tempo, tendências, valores médios, valores extremos, gradientes espaciais e a frequência das oscilações), das condições atmosféricas (como a temperatura, a humidade, a luz do sol e velocidade do vento) e o intercâmbio com outros órgãos (como a emissão de infravermelhos, o aquecimento, a iluminação, ventilação), durante um período de tempo representativo de todas as condições determinadas quer por factores naturais quer por factores artificiais.

Embora tradicionalmente os ambientes internos e o ar livre sejam considerados bastante distintos, na prática apresentam problemas semelhantes. Ambos passam por ciclos diários de temperatura e humidade, sofrem aquecimento que pode provir apenas do ciclo solar ou por aquecimento forçado, estão expostos à radiação, seja ela proveniente da radiação solar directa quer através de janelas ou luz artificial e são afectados por movimentos de ar, que pode ser provocado pelo vento, por passagem de ar através de fendas e de janelas, ou correntes provocadas por fontes de calor, por movimentos de pessoas. Chuvas e orvalhos

são característicos de ambientes ao ar livre mas por vezes as chuvas penetram através dos materiais de construção, formam-se condensações nas janelas, na superfície de objectos frios

ou no interior dos poros dos materiais. Poluentes externos podem penetrar através das janelas e de portas e transportados de sala em sala e depositados através dos mesmos mecanismos quer seja no exterior quer seja no interior. A diferença mais importante é que o microclima interior pode ser controlado, pelo menos em princípio, enquanto o clima exterior não o pode ser. Mas é muito importante saber como alterar o clima interior correctamente [16,25].

A destabilização das condições internas naturais, introduzido através de aquecimento pode gerar vários problemas e colocar a integridade física das obras em causa, originar a deposição de poluentes, provocar o escurecimento das superfícies, e provocar a condensação sobre as superfícies frias.

Embora tenha sido salientado ao longo dos anos que a alteração do microclima interior pode ao longo de um grande período de tempo, a importância do microclima interior muitas vezes são utilizados inadequados padrões de conforto, os quais são baseados no bem-estar humano e não na ciência de conservação dos materiais [31].

5.2 Mecanismos de degradação

5.2.1 Mecanismos de degradação por temperatura

A temperatura é um factor muito importante na conservação de obras de arte, pois as alterações deste parâmetro podem induzir expansões diferenciais nos materiais e forças de tração entre as várias camadas.

Os ciclos de temperatura conduzem a mecanismos de desgaste e aceleram a falha por fadiga nos materiais mais sensíveis. Em ciclos rápidos quanto maior for o gradiente de temperatura que incide no material, maior será a resistência e mais rápido se dará o envelhecimento e os danos na camada superficial. As várias camadas de material actuam como um filtro atenuando a passagem do gradiente de temperatura para as camadas interiores, sendo sempre afectada a camada superficial. Como a parte fundamental de um monumento encontra-se na camada superficial os ciclos diários de temperatura são mais importantes do que os ciclos sazonais devido ao ciclos diários afectarem sempre a camada superficial.

Em rochas utilizadas para na construção de edifícios os ciclos térmicos podem causar desagregação mecânica na sua camada superficial e nas interfaces entre os diferentes materiais que as formam. Nas rochas com textura cristalina ou granular, como o mármore ou o granito, a alteração de temperatura gera tensões entre grãos ou cristais que podem ter diferentes orientações, aumentando a fadiga da rocha e consequentemente a desagregação granular da mesma. A alteração da temperatura em rochas porosas causa variações de humidade relativa que por sua vez se encontra relacionado com a evaporação de água nos poros, aumentando a concentração de sais dissolvidos e quando atinge valores de saturação, contribui para a formação de condensações superficiais.

Na análise de estabilidade de uma estrutura tornam-se importantes os mecanismos de expansão principalmente quando a estrutura apresentam uma constituição composta por diferentes materiais. Cada material apresenta um coeficiente de dilatação pelo que quando

sujeitos a variações térmicas irão apresentar diferentes retrações e dilatações o que contribui para a fadiga da estrutura e desagregação dos materiais.

Outra consequência das variações de temperatura é o facto de originarem alterações no grau de saturação do vapor de água e na quantidade de água adsorvida pelos materiais. Em materiais como a madeira, pergaminho, marfim e gesso a alteração do teor de água conduz à expansão e retração dos mesmos e consequentemente ao aumento da sua fragilidade. Por exemplo, a madeira é caracterizada por apresentar uma pequena condutibilidade térmica e a propagação de alteração de temperatura pelo seu interior é acompanhada pela alteração da humidade relativa seguido de uma alteração no teor de água contribuindo para a formação de tensões diferenciais e por consequência expansão e retração da madeira.

A temperatura do ar é também um importante factor para o desenvolvimento de vida biológica. Em temperaturas abaixo dos 20°C os processos metabólicos são reduzidos e a biodegradação devido a bactérias pode ser evitada com uma escolha adequada deste e de outros factores, como a humidade, iluminação e ventilação. Para temperaturas entre os 20°C e os 35°C a actividade microbiológica encontra-se favorecida produzindo efeitos negativos nos materiais. O desenvolvimento de microorganismos na superfície de pedras e outros materiais causa um impacto negativo a nível visual e contribuiu para melhorar o depósito de partículas. Altera ainda a porosidade, a capacidade de adsorção do material e a condutibilidade térmica o que contribui para a variação do teor de água do material [9,34]

A formação de correntes convectivas no interior de um edifício origina a movimentação do ar que se por sua vez contribui para o depósito de partículas poluentes na superfície dos materiais contribuindo para a sua degradação [9,32]. Além das correntes convectivas também se deve ter em atenção os movimentos de ar provenientes das janelas, portas e outras aberturas, pois provoca o movimento e depósito de partículas de sujidade na superfície dos materiais [34,11].

5.2.2 Mecanismos de degradação por humidade

Os níveis de humidade podem aumentar os níveis de degradação de diversas maneiras. A fim de esclarecer os efeitos da acção da humidade é necessário sintetizar alguns mecanismos chave da água em alguns materiais.

Pedras, materiais cerâmicos, gesso, frescos e outros materiais com sais solúveis em água nos poros são sensíveis às mudanças do microclima. Condições ambientais que conduzam a ciclos de humidade relativa podem gerar cristalização e dissolução de sais por meio de dois mecanismos:

- i. Evaporação da água, que é controlada pela humidade relativa, provoca uma concentração do soluto e precipitação de cristais de sal;
- ii. Sais higroscópicos, que se encontram em forma cristalina em ambiente seco, tornam-se deliquescentes e precipitam com os ciclos de humidade relativa.

Estes mecanismos podem gerar danos mecanismos cumulativos, eflorescências, subflorescências, laminação, fragmentação e descamação.

Nos metais o processo de degradação devido à humidade designa-se como corrosão. Corrosão é o resultado destrutivo de uma reacção química entre um metal e o meio ambiente, incluindo também a oxidação, que é a primeira forma de deterioração do metal. A corrosão metálica envolve a transferência de cargas electrónicas em soluções aquosas pelo que na presença de água os metais tendem-se a combinar com outros compostos químicos e retornam a uma forma semelhante à dos minerais a partir dos quais foram extraídos, libertando a energia requerida durante a sua extracção.

No caso do vidro existem os seguintes mecanismos de deterioração:

- i. Soluções químicas podem provocar alterações na sua superfície, que se podem espalhar por todo o vidro;
- ii. A água gerada por condensações, proveniente da chuva, ou por adsorção de vapor de água, é necessária para a substituição dos protões na difusão de iões alcalinos e consequente hidratação da cadeia de sílica. As moléculas de água podem-se difundir por lixiviação através de pequenas fendas, actuando sobre os carbonatos de sódio e potássio que são deliquescentes, causando trocas iónicas e extracção de metais alcalinos;
- iii. Em ambiente seco ou sob a acção da radiação solar, a perda de água absorvida provoca a desidratação.

Desde modo conclui-se que mesmo na ausência de poluição os ciclos de humidade relativa podem provocar a degradação do vidro.

A madeira e o papel são compostos principalmente por cadeias de celulose que são formadas a partir de moléculas de glicose. Cada unidade de glicose possui três grupos de hidroxila, que têm afinidade com a água. Quando a água é absorvida é retida entre as cadeias de celulose, o que faz com que o material aumente as suas dimensões e diminua a força para a atenuação dos limites de hidrogénio e das forças intermoleculares de Van der Waals, podendo originar o aparecimento de fendas de tração quando o material está sujeito a ciclos repetidos de humidade relativa. A presença de água também pode provocar hidrólise lenta, mas progressiva de celulose que é produzida, o que vai romper as ligações entre as unidades de glicose, quebrando a cadeia de celulose em várias cadeias mais pequenas e mais fracas com um mecanismo de despolimerização. Uma outra consequência é a oxidação ou degradação química que é feita a partir de polpa de madeira e contém vários elementos ácidos. Este dano é grave principalmente na presença de poluentes atmosféricos, em especial de ozono. Quando o armazenamento de papel é realizado em ambientes húmidos liberta ácido sulfúrico que acelera a degradação. Por último, pode ainda existir a biodeterioração.

A estrutura molecular do papel é mais sensível do que a da madeira, pelo que é mais sensível às mudanças de humidade e pode ser alterada por valores baixos de humidade. Um ambiente caracterizado por ser moderado frio e seco é o melhor para o armazenamento do e conservação do papel, mas torna o papel quebradiço. Já um ambiente com humidade moderada torna o manuseamento do papel mais fácil, devido ao facto de provocar a absorção de moléculas de água o que assegura a mobilidade das cadeias de celulose e

consequentemente o aumento da flexibilidade. Conclui-se que consoante o uso do papel os valores recomendados para a humidade relativa podem variar, podendo ser encontrado na literatura vários valores, por exemplo entre 45% e 65%.

O microclima deve ser cuidadosamente escolhido de modo a reduzir ou eliminar o risco de ataque biológico por fungos, bactérias ou outras parasitas nos materiais. Por exemplo, algas e cianobactérias necessitam de valores altos de humidade relativa para se desenvolverem, fungos geralmente preferem humidades relativas superiores a 65 %, mas em materiais já contaminados que deve ser considerado humidades relativas superiores a 50% Valores elevados de humidade relativa quando associados a temperaturas superiores a 20°C favorecem o apodrecimento, especialmente no caso de materiais orgânicos, cuja a composição é favorável para o desenvolvimento de parasitas ou pode oferecer um com substrato para o desenvolvimento de vida biológica [9,34].

5.2.3 Condições ideais para conservação

Durante muitos anos a grande preocupação durante a análise de um microclima dos edifícios estava relacionado com o conforto dos utilizadores, por exemplo, com a instalação de sistemas de climatização que propiciam a alteração do clima histórico a que os materiais se adaptaram. Contudo, os edifícios históricos, tais como as igrejas, têm sido valorizados e formou-se a ideia de que estes edifícios devem ser preservados. Tornou-se imperativo a análise do clima interior e concluiu-se que alguns níveis de humidade relativa e temperatura são frequentemente associados a mecanismos de deterioração específicos ou pode acelerá-los [33, 9].

Já foi referido que alguns níveis de humidade são frequentemente associados a mecanismos de deterioração específicos, ou pode funcionar como um factor acelerante. As moléculas de água absorvidas pelo material podem desenvolver tensões internas e algumas deformações na estrutura. A quantidade de água absorvida está em equilíbrio com a humidade relativa e com a temperatura embora, seja em menor grau. Essas deformações tendem a ser reversíveis em plástico e novos materiais, mas são irreversíveis e extremamente perigoso no caso dos materiais mais antigos. É por este motivo que o microclima deve ser cuidadosamente analisado e até controlado de forma a manter a correcta conservação dos materiais [9].

Deste modo, a preocupação com microclima interior é algo que tem sido debatido ao longo dos anos. É possível encontrar na literatura vários valores recomendados para a adequada conservação dos materiais. Na tabela 5.1 encontra-se uma selecção de normas e especificações de temperatura e humidade relativa desde 1970, todas elas destinadas a assegurar a preservação segura de materiais e objectos [8].

Tabela 5.1 – Normas e especificações de temperatura e humidade relativa [8]

Ano	Fonte ou instituição emissora da especificação	Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]			Observações
			A médio-longo prazo	Ciclos sazonais	Variações a curto prazo	
1978	Garry Thomson The Museum Environment	19 (Inverno) até 24 (Verão)	50 ou 55	-	±5	Classe 1 - apropriado para a grande museus nacionais, novos ou antigos, e também para todos os novos importantes museus
		Razoavelmente constante para estabilizar a humidade relativa	40 a 70			Classe 2 - destinadas a evitar grandes perigos, Aplicável, por exemplo, para controlo do clima controle de edifícios históricos e igrejas
1979	Canadian Conservation Institute	21 (Permitido variação sazonal de 20 a 25)	Entre 47 e 53	38 a 55	±2	Para os ciclos sazonais são permitidas variações de 1°C para a temperatura e 5% para a humidade relativa Ocasionalmente variações de ± 5% de humidade relativa são toleráveis
1994	National Trust	5 a 22	58	50 a 65 (Nível 1)		A estratégia recomendada envolve o controlo da humidade relativa a um nível constante, ajustando a entrada de calor
				40 a 75 (Nível 2)		
1999	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditionig Engineers Inc. (ASHRAE)	15 a 22	50 ou média anual	Não	±5	Classe de controlo AA - Não há risco de danos mecânicos para a maioria artefactos e pinturas
				Não	±10	Classe de controlo A - Pequeno risco de danos mecânicos para artefactos de alta vulnerabilidade; nenhum risco mecânico para a maioria artefactos, pinturas

5.2. Mecanismos de degradação

Ano	Fonte ou instituição emissora da especificação	Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]			Observações
			A médio-longo prazo	Ciclos sazonais	Variações a curto prazo	
1999	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE)	15 a 22	50 ou média anual	+10 no Verão -10 no Inverno	±10	Classe de controlo B - Risco de danos mecânicos moderado para artefactos de alta vulnerabilidade; reduzido risco para a maioria das pinturas
				25 a 75		Classe de controlo C - Alto risco de danos mecânicos para artefactos de alta vulnerabilidade; moderado risco para a maioria das pinturas
				Abaixo de 75		Classe de controlo D – alto risco de danos mecânicos de forma imediata ou para a maioria artefactos
2006	National Trust	5 a 22	50 a 65	-	-	O ponto definição deve ser fixo antes de 58% de humidade relativa. O valor da humidade relativa deve ser ajustável em cada compartimento e depende das condições que a coleção se encontra ambientada
2007	Smithsonian	21	45	-	±8	
2009	National Museum Directors' Conference UK	16 a 25	40 a 60			Especificação para a maioria de objetos contendo na sua composição material higroscópico No entanto, as pinturas estão listadas entre os materiais mais sensíveis que exigem um controlo específico e apertado da humidade relativa

Ano	Fonte ou instituição emissora da especificação	Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]			Observações
			A médio-longo prazo	Ciclos sazonais	Variações a curto prazo	
2010	European standard EN 15757:2010	Não especificado	Média anual	Ciclo histórico sazonal *	±10 ou valor calculado a partir da história do clima ** (o que for superior)	<p>* Este ciclo é obtido pelo cálculo, para cada leitura de humidade relativa, da média móvel com leitura efectuada 15 dias antes e após o momento em que a média é calculada</p> <p>** Os limites superiores e inferiores do intervalo de humidade relativa são determinados com 7º e 93º percentil das variações registadas durante o período de monitorização</p> <p>A variação é calculada em relação ao MA, isto é, a estação ciclo, em vez de o valor médio anual</p>

A tendência geral de as recomendações apenas referirem um único valor tem sido ultrapassada, passando a existir abordagens baseadas nas mudanças sazonais e flutuações mais amplas de curto prazo. As especificações têm gradualmente reconhecido que o que o valor recomendado para a temperatura não necessita estar de acordo com o valor universal de cerca de 20°C ditado pelo conforto humano, sendo referenciado pelo *National Trust*, no Reino Unido, que o limite inferior para a temperatura é de 5°C.

As especificações referem que o valor de humidade relativa deve ser tão constante quanto possível e deve encontrar-se, idealmente, próximo de 50% por se encontrar próximo da média anual ao ar livre nos locais onde as especificações foram realizadas. No entanto existe uma consciência de que os objectos armazenados em ambientes onde a média anual de humidade relativa se afasta dos 50% força a que se tenha de climatizar para tornar estas condições possíveis [8].

Contudo qualquer mudança num microclima de um edifício histórico pode ser problemático, mesmo que as novas condições possam parecer óptimas para a preservação a longo prazo.

É necessário referir que os valores recomendados de temperatura e humidade relativa para alguns materiais podem não o ser para artefactos antigos construídos com esses mesmos materiais. Um artefacto antigo que passa séculos sujeito a determinadas condições evolui de modo a se adaptar ao ambiente, podendo ter ocorrido falhas ou fracturas, encontrando-se sujeitos a tensões internas, o que eventualmente os conduziu a novos equilíbrios com deformações permanentes. Como o artefacto se adaptou ao ambiente de acordo com o campo interno de tensões passado e perdeu a sua elasticidade inicial é incapaz de se adaptar novamente a um microclima. Por esta razão torna-se necessário um conhecimento preciso das condições passadas, devendo-se manter o microclima, pois as alterações do microclima podem levar a danos mesmo que as alterações realizadas sejam consideradas vãs vantajosas para os materiais [9,34,7]. As especificações foram sofrendo alterações e foi recomendado que os limites possam basear-se nas condições climáticas a que os materiais têm sido sujeitos.

A especificação ASHRAE especifica cinco classes de qualidade climática detalhando quais os riscos das condições climáticas associadas a cada classe. Esta especificação afirma que o nível de humidade relativa a longo prazo pode ser 50% ou um valor baseado na média anual. Na Norma Europeia 15757:2010 os valores de humidade relativa também deixam de ser referidos por um único valor e passam a ser baseados na média anual e nos ciclos sazonais [8,37].

Quando um objecto se adapta a valores específicos de temperatura e humidade relativa eles necessitam de condições estáveis e cada variação desses parâmetros pode desencadear mecanismos de degradação ou acelerar os processos de deterioração. Por este motivo cada mudança abrupta é perigosa, assim como os ciclos diários. Os ciclos diários são repetitivos e actuam de forma cumulativa até causar degradação por fadiga [7,20,34]. Considera-se que em ciclos sustentáveis para a conservação podem ocorrer variações diárias de 3,2°C para a temperatura e 7% para a humidade relativa, considerando que quando se atinge o dobro destes valores pode ser desvantajoso para a conservação. As mudanças sazonais embora tenham um período mais amplo são menos perigosas devido a ocorrerem de forma lenta e num período de tempo muito mais longo que o tempo de relaxamento do material e não existindo tensões significativas entre as camadas do objecto. No entanto essas alterações também podem ser perigosas no caso de materiais não homogéneos devido a cada material apresentar um coeficiente de dilatação pelo que quando sujeito a variações térmicas irão apresentar diferentes retrações e dilatações [20,34,11].

No caso de edifícios antigos, onde não existe controlo do clima de forma mecânica, as paredes com elevada espessura e massa conferem elevada inércia térmica ajudando a diminuir as flutuações de temperatura e humidade relativa no seu interior, contribuindo para um microclima natural, estável e adequado [34].

Capítulo 6

Caso de estudo

6.1 Descrição do edifício

O presente estudo tem como objectivo avaliar o clima interior da igreja de São Cristóvão localizada no centro histórico da cidade de Lisboa, no Largo de São Cristóvão, situado no topo das escadilhas de São Cristóvão.



Figura 6.1 – Igreja de São Cristóvão

Capítulo 6. Caso de estudo

A igreja pertence à freguesia de São Cristóvão e São Lourenço, uma das freguesias mais antigas da cidade de Lisboa, localizada numa das zonas mais nobre da cidade ao largo da encosta do Castelo de São Jorge [26,24].

Foi construída no século XIII em honra a Santa Maria de Alcamim e no século XVI, durante o reinado de D. Manuel I, foi totalmente destruída por um incêndio e reconstruída no mesmo local. Até 1702 sofreu várias intervenções de restauro e remodelação que lhe conferiram um aspecto bastante diferente do edifício inicial [12]. Foi um dos poucos monumentos do centro de Lisboa que resistiu ao terramoto de 1755, verificando-se apenas alguns danos nas torres e alguns remates [3,30].

Apresenta uma fachada principal, de acentuada verticalidade e paredes espessas, dividida por cunhais e pilastras formando três panos. O plano central apresenta um pórtico em arco emoldurado em cantaria, pelo qual se realiza a passagem para o interior da nave principal. Por cima do pórtico encontra-se uma janela simples de vão retangular. Nos planos laterais existem várias janelas de diferentes dimensões que permitem a iluminação do interior. Sobre a cornija existem duas torres, com paredes espessas de pedra, rasgadas por sineiras nas quatro faces e coroadas por cúpula e grimpas. No recanto formado pelo corpo lateral do lado Norte, existe uma escada de dois pisos, iluminada através de janelas da fachada, que dá acesso ao coro [12,30].

A cobertura constituída por estrutura de madeira, com desvão acessível, e telhado de telha cerâmica sendo sobre a nave principal e sacristia de duas águas e na casa-mortuária e altar-mor de quatro águas. As paredes são espessas e revestidas por pedra calcária, sendo as paredes na zona do altar-mor enterradas.

Encontra-se na figura 6.2 uma fotografia do interior da igreja.

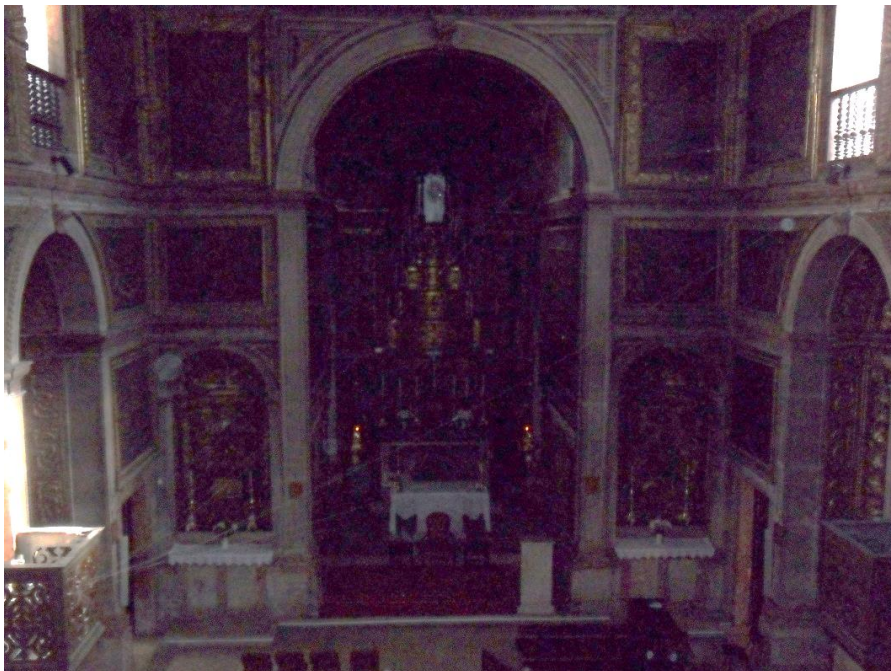


Figura 6.2 – Interior da igreja de São Cristóvão

O interior da igreja é bastante decorado e constituído por altar-mor, nave principal com cinco nichos de altares e dois púlpitos, sendo as espessas paredes bastante decoradas através de revestimentos de talha dourada, pinturas a óleo e painéis de azulejo na parte inferior das paredes. A igreja tem ainda a norte da nave principal a sacristia, uma casa-mortuária a sul da nave principal que permite o acesso a um coro elevado e a um piso superior com janelas e varandas. O tecto da nave principal é plano, de madeira, com pinturas ornamentais, enquanto o tecto do altar é de alvenaria estucada, também este com pinturas ornamentais [30].

Nas figuras 6.3 e 6.4 encontra-se a planta e um corte longitudinal da igreja, respectivamente.

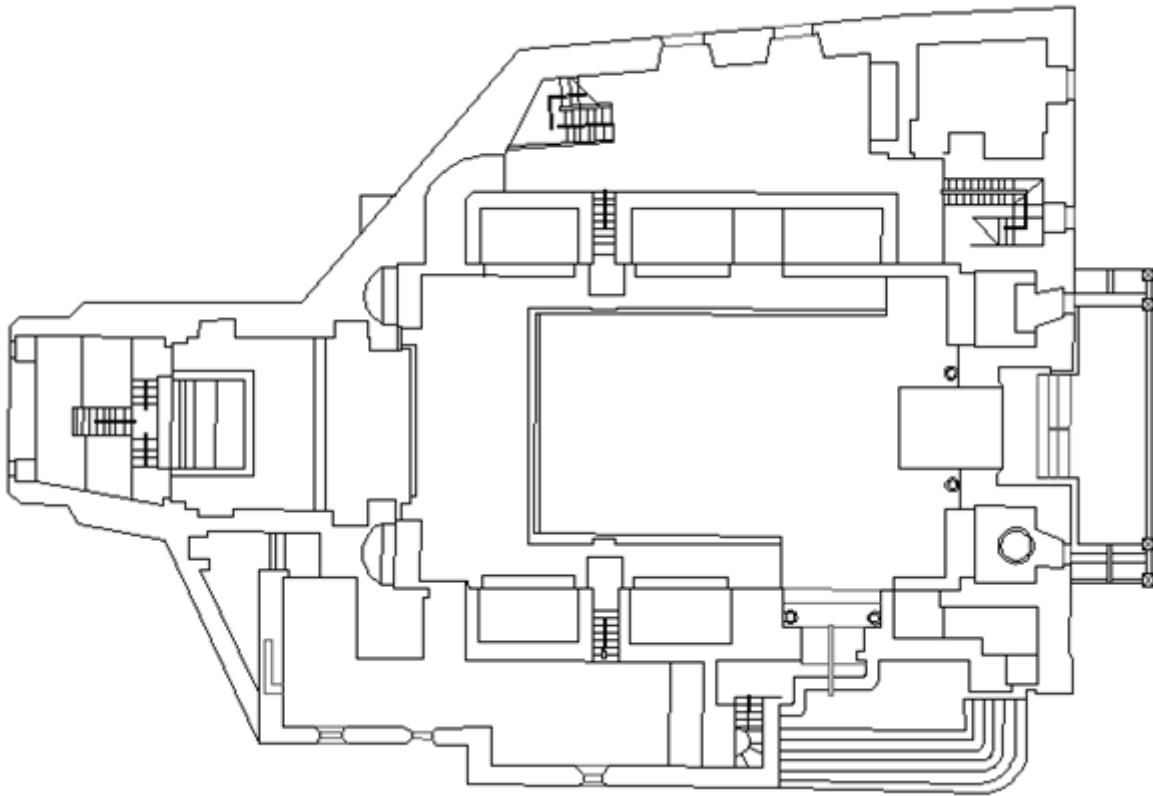


Figura 6.3 – Igreja de São Cristóvão [34]



Figura 6.4 – Igreja de São Cristóvão [34]

6.2 Identificação de anomalias

Durante as visitas à igreja foram observados diversas anomalias no seu interior e exterior.

Relativamente ao exterior é necessário ressaltar a degradação dos rebocos exteriores principalmente nas laterais e no alçado posterior. Devido à inexistência de drenagem periférica as águas pluviais acumulam-se na parte inferior das paredes, formando-se manchas escuras nas paredes e permitindo a passagem da água para o interior das paredes por capilaridade. É possível ainda observar fissuração nas paredes exteriores. As figuras 6.5 e 6.6 são fotografias das anomalias observadas no exterior da igreja [30].

Também é necessário evidenciar que o Homem também contribuiu para a degradação do exterior com a elaboração de *graffitis* nas paredes (figura 6.5).

Na figura 6.1 é possível identificar a presença de sujidade e colonização biológica na fachada principal.

As paredes da nave principal da igreja são revestidas de pedra calcária. Através das figuras 6.7 e 6.8 observa-se que existe alteração do cromatismo, textura, fracturas, fissuras e alguns destacamentos [30].



Figura 6.5 – Degradação do reboco



Figura 6.6 – Degradação do reboco e manchas escuras na zona inferior das paredes



Figura 6.7 – Degradação das cantarias

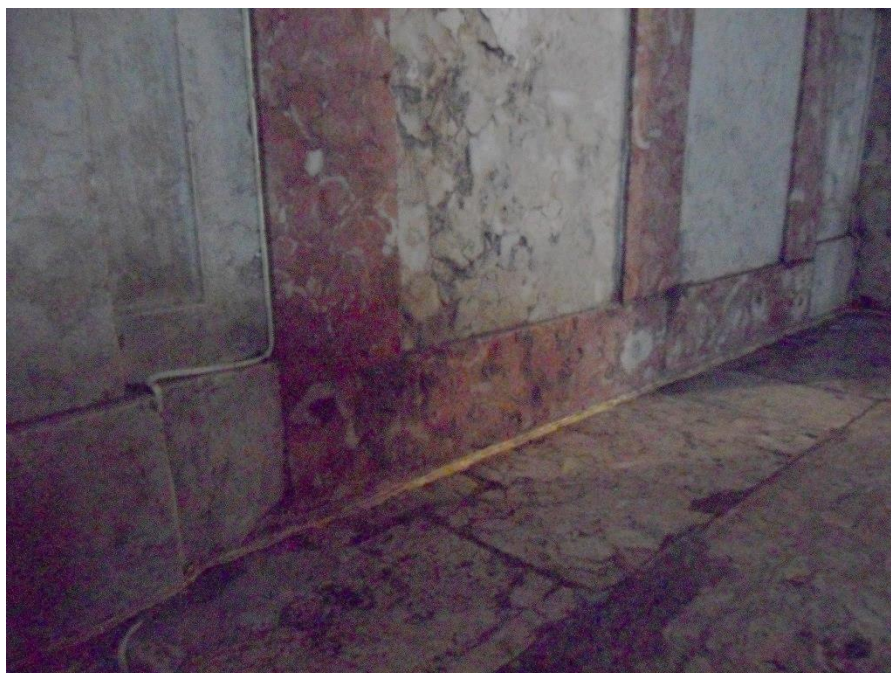


Figura 6.8 – Alterações cromáticas nas parede

6.2. Identificação de anomalias

Nas figuras 6.9 e 6.10 encontram-se duas fotografias de pinturas a óleo que se encontram na nave-principal. É possível observar o escurecimento das pinturas devido ao depósito de poeiras e de cera de velas. Além disso é possível observar que se encontram com ondulações, ressequidas e com fissuras. Relativamente à talha esta encontra-se muito suja, com depósitos de cera de velas, poeiras e falhas da folha metálica [30].

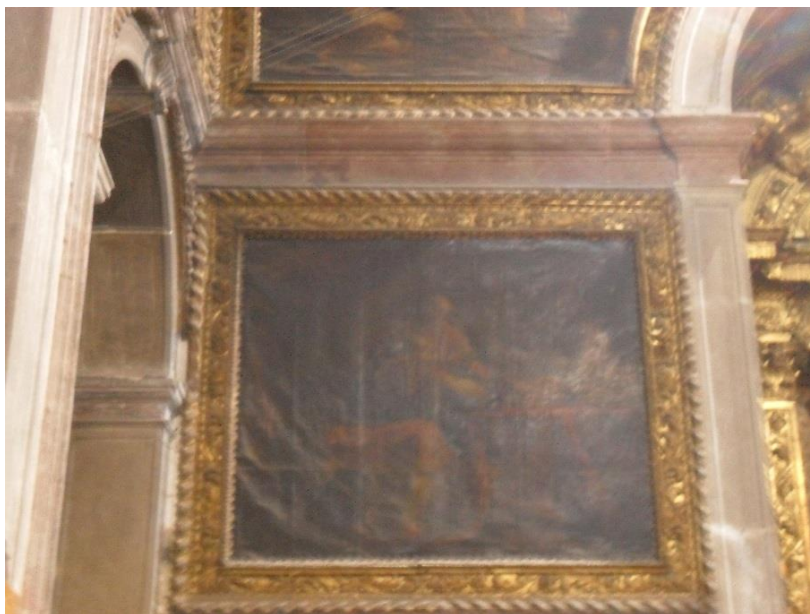


Figura 6.9 – Escurecimento de pintura a óleo



Figura 6.10 – Fragmentação da pintura a óleo e da talha

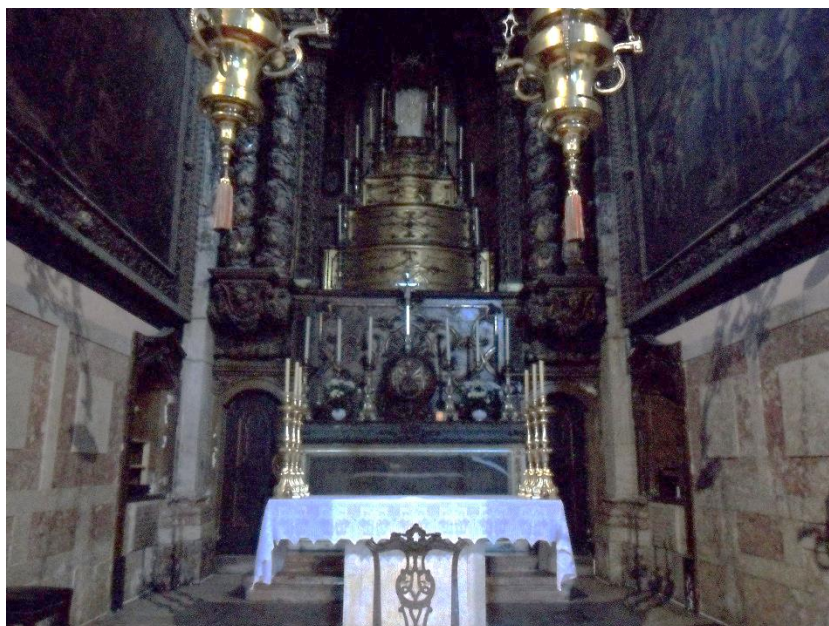


Figura 6.11 – Escurecimento da pintura a óleo e da talha do altar-mor

Na figura 6.12 encontra-se uma fotografia da cornija na qual se pode observar a presença de bolores, sujidade e algumas zonas de lacuna. Os bolores devem ter como causa infiltrações ocorridas antes de uma intervenção na cobertura [30].

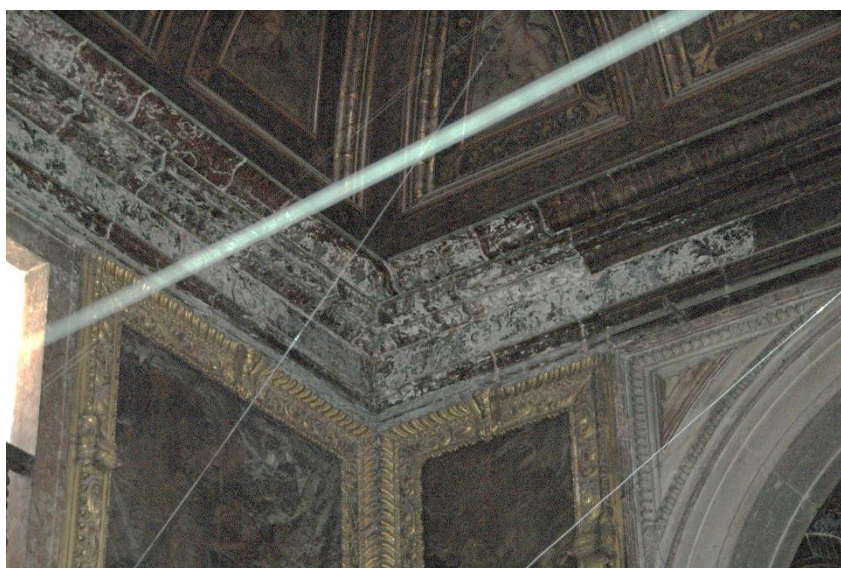


Figura 6.12 – Bolores na cornija

Na figura 6.13 encontra-se uma fotografia do tecto da nave-principal, na qual é possível observar escurecimento e sujidade na camada cromática [30].



Figura 6.13 – Degradação do tecto

6.3 Descrição dos ensaios

6.3.1 Equipamentos utilizados

Para a obtenção das temperaturas e humidades relativas do edifício em estudo procedeu-se ao registo destes valores no interior e exterior da igreja com recurso a vários equipamentos.

Para a monitorização automática das condições higrotérmicas foi utilizado um *data logger* e seis dispositivos portáteis de dois modelos diferentes. O *data logger* é um aparelho receptor de dados da marca Delta T, modelo DL2e que permite acoplar a si uma grande variedade de sensores, tendo-se neste caso utilizado termopares e uma sonda composta por um termopar e um sensor de humidade relativa. Da totalidade dos dispositivos portáteis três são da Onset Computer Corporation de modelo HOBO U12-13 e três da Rotronic de modelo Hygrolog HL-NT2.

Para a realização das medições manuais foi utilizado um aparelho de medição de temperaturas superficiais, uma câmara de termografia da marca FLIR, modelo ThermaCam B4 e um dispositivo portátil HOBO U12-13.

6.3.1.1 Data Logger

O *data logger* foi utilizado para determinar e gravar as temperaturas e humidades relativas da nave principal da igreja (figura 6.14).

Capítulo 6. Caso de estudo

Utilizou-se um *data logger* da marca Delta T, modelo DL2e que permite realizar e gravar leituras num determinado local com um erro normal de $\pm 0,02\%$ podendo atingir um erro máximo de 0,1%. Como é um aparelho programável pode receber dados de uma grande variedade de sensores e realizar as leituras no intervalo de tempo pretendido [39].

Este dispositivo contém quatro grupos de terminais, em que cada um tem quinze entradas de dados, ou seja, cada um consegue receber até quinze sensores. É alimentado por corrente elétrica ou por baterias internas, pilhas do tipo AA, possuindo ainda uma pilha de lítio que lhe permite efectuar registos no caso de uma das fontes de alimentação falhar [38].



Figura 6.14 – Data Logger DL 2

Para o presente caso foram utilizados dois grupos de terminais com vinte termopares e uma sonda de temperatura e humidade relativa.

Para que se possa programar e aceder aos dados o *data logger* é necessário que este esteja ligado a um computador através de um cabo RS232 e ter instalado o grupo de programas LsWin, constituído por quatro programas distintos: o DL2 Program Editor, New DL2 Control Panel, DL2 Dataset Viewer e o Dataset Import Wizard.

O *DL2 Program Editor* serve para programar o *data logger*, possibilitando definir quais as portas com sensores, o tipo de sensor e o intervalo entre leituras.

Para que se possa aceder a informações sobre o dispositivo, visualizar os dados registados e recuperar os dados para um ficheiro utiliza-se o programa New DL2 Control Panel.

Para visualizar os dados transferidos recorre-se ao programa DL2 Dataset Viewer e para os importar para uma folha de cálculo utiliza-se o programa Dataset Import Wizard [38].

6.3.1.2 Termopares

Ao *data logger* foram acoplados vinte termopares que permitiram realizar medições das temperaturas ao longo da nave principal da igreja

Um termopar consiste na junção de dois metais diferentes, um a desempenhar as funções de termo-elemento positivo e o outro termo-elemento negativo, o que possibilita medir a diferença de potencial eléctrico existente entre os dois metais criado pela temperatura existente no local [20].

Neste caso utilizou-se um termopar do tipo T, constituído por dois fios condutores, um de cobre que funciona como termo-elemento positivo e outro de uma liga metálica denominada constantan que funciona como termo-elemento negativo [23]. Os termopares apresentam um erro máximo de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre os -20 e os $+60^{\circ}\text{C}$ e uma distância máxima ao aparelho central de dez metros, a partir da qual o erro tende a aumentar [25].



Figura 6.15 – Termopares do tipo T

Através da figura 6.15 é possível observar dois tipos de fios com cores distintas. O fio de cor castanha corresponde ao cobre e o de cor branca ao de constantan.

O termopar deve estar ligado ao dispositivo de leitura, *data logger*, e as pontas dos dois fios condutores devem estar unidas no local onde se pretende saber a temperatura.

6.3.1.3 Sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl

A sonda RHT2nl da marca Delta T encontra-se ligada ao *data logger* e serve para efectuar medições de temperatura e humidade relativa.

As medições de temperatura são efectuadas por um termístor que realiza a medição através da variação da condutibilidade eléctrica de um elemento sensível á acção da temperatura com uma precisão de $\pm 0,1\%$ para uma gama de temperaturas entre -20°C a $+60^{\circ}\text{C}$ [7,9].

A sonda de humidade relativa para uma temperatura do ar 23°C apresenta um erro de $\pm 2\%$ para humidades entre os 5 e os 95% e de $\pm 2,5\%$ para humidades inferiores 5% e superiores a 95% [41].

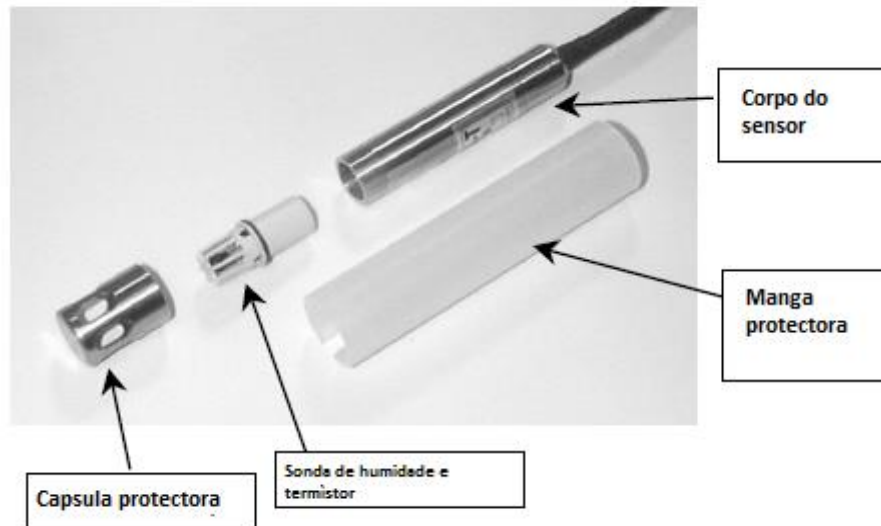


Figura 6.16 – Esquema da sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl [34]



Figura 6.17 – Sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl

A sonda RHT2nl é constituída pelo corpo do sensor onde encaixa a sonda de humidade relativa e o termístor no qual encaixa uma capsula protectora (figuras 6.16 e 6.17). Todo o sensor se encontra envolvido por uma manga protectora [41].

6.3.1.4 Hobo U12-13

Colocaram-se ao longo da igreja três Hobo U12-13 (figura 6.18) da marca Onset Computer Corporation para efectuar medições de temperatura, por intermédio de um termístor, e medições de humidade relativa com um sensor específico.



Figura 6.18 – Hobo U12-13

Estes dispositivos têm a capacidade de medir temperaturas numa gama entre os -20°C e os 70°C com uma precisão de 0.03°C e um erro máximo de $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$. No que se refere à humidade relativa consegue medir numa gama de valores entre os 5% e os 95% com uma precisão de $\pm 0,03\%$ e um erro de $\pm 2,5\%$ para humidades relativas entre os 10 e 90% [21].

Os HoboU12-13 são aparelhos portáteis, de pequena dimensão alimentados através de uma pilha de lítio e com uma memória de 64Kb. Para aceder, aos registos e programar o HOBO U12-13 utiliza-se o programa HOBOWare Lite, sendo a ligação ao computador realizada através de um cabo mini USB [21].

6.3.1.5 Rotronic Hygrolog HL-NT2

Utilizaram-se três sensores Rotronic Hygrolog HL-NT2 da marca Rotronic para efectuar medições de temperatura e humidade relativa (figura 6.19).

São aparelhos portáteis equipados com um cartão de memória de 16MB, alimentados por uma pilha alcalina de 9 V. Apresentam a capacidade de medir temperatura numa gama entre os -30°C e os 70°C e humidades relativas entre os 0% e os 100% com um erro máximo de $\pm 1,5\%$ para uma temperatura constante de 23°C .

O aparelho é dotado de um ecrã próprio que permite aceder aos dados e programar o dispositivo, mas tal também pode ser realizado utilizando o programa HW4-E [40].



Figura 6.19 – Rotonic Hygrolog HL-NT2 e cabo para ligação ao computador

6.3.1.6 Aparelho de medição de temperaturas superficiais

Para obter temperaturas superficiais foi utilizado um termómetro digital da marca Roline, modelo 305 (figura 6.20).

Este termómetro efectua as medições através de um termopar do tipo K que se encontra na sua ponteira e é alimentado através de uma pilha alcalina de 9 V.

Apresenta uma precisão de 0,1°C, com um erro máximo de $\pm 1^\circ\text{C}$.

O aparelho é dotado de um visor próprio através do qual é possível retirar as medições.



Figura 6.20 – Aparelho de medição de temperaturas superficiais

6.3.1.7 ThermaCAM B4

A câmara de termografia da marca FLIR, modelo ThermaCAM B4 (figura 6.21) foi utilizada esporadicamente para obter temperaturas superficiais.



Figura 6.21 – ThermaCAM B4

Este equipamento contém um programa próprio e um ecrã LCD com 2,5'' que permite definir a emissividade, um ponto ou uma área onde se deseja medir as temperaturas superficiais e ver todas as imagens que estão a ser gravadas. Funciona com recurso a uma bateria recarregável de Li/Ion que possibilita um período de funcionamento de 1,5h; tem uma precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

As imagens podem ser transferidas para um computador com recurso a um cabo USB/RS-232 e com a utilização do programa ThermaCam Connect. Através da aplicação FLIR Quick Report é possível abrir todas as imagens recolhidas pela câmara de termografia, assim como obter a temperatura superficial em qualquer ponto da imagem [29].

6.3.2 Monitorização automática do clima interior e exterior da igreja

Na monitorização automática do clima interior da igreja, ou seja, para efectuar o controlo das temperaturas e humidades relativas foram instalados diversos sensores ao longo da mesma.

Para tal instalaram-se vinte termopares ligados a um *data logger* que efectua o registo das medições realizadas pelos termopares, três Hobo U12-13 e três Rotronic Hydrolog HL-NT2

Para a realização do presente estudo monitorizou-se o clima interior e exterior da igreja entre 1 de Novembro de 2012 e 18 Julho de 2013.

6.3.2.1 Breve descrição das medições realizadas pelos termopares e pela sonda de temperatura e humidade relativa

Os termopares e a sonda de temperatura e humidade relativa foram instalados de modo a realizarem a monitorizarem a nave principal da igreja.

Os termopares realizam medições de temperatura e a sonda de temperatura e humidade relativa, tal como o nome indica, realiza medições de temperatura e humidade relativa que serviu de referência para os termopares. O intervalo definido entre medições era de 10 minutos.

Para que fosse possível identificar estes sensores de forma rápida e tornar mais simples o tratamento de dados identificaram-se todos os sensores ligados ao *data logger* com uma numeração de 1 até 21.

- **Distribuição dos sensores pela nave principal da igreja**

Os sensores foram colocados ao longo da nave principal de modo a cobrir toda a área e obter registos a diversas cotas.

Dos vinte termopares, quatro realizaram medições das temperaturas superficiais e dezasseis realizaram medições da temperatura do ar.

Na tabela 6.1 encontra-se um resumo da localização dos diversos sensores.

Tabela 6.1 – Distribuição dos sensores pela igreja

Termopares e sensor de temperatura e humidade relativa	Numeração	Tipo	Localização	
			Espacial	Cota (m)
	1	Superficial	Fachada norte	3,90
	2	Superficial	Fachada norte	1,50
	3	Superficial	Pavimento-degrau	0,15
	4	Superficial	Pavimento	0,00
	5	Ar	Púlpito norte	3,90
	6	Ar	Meio da nave	3,90
	7	Ar	Púlpito sul	3,90
	8	Ar	Fachada norte	7,50
	9	Ar	Meio da nave	7,50
	10	Ar	Fachada norte	1,5
	11	Ar	Fachada norte	0,15
	12	Ar	Fachada norte	10,00

Termopares e sensor de temperatura e humidade	Numeração	Tipo	Localização	
			Espacial	Cota (m)
	13	Ar	Púlpito sul	7,50
	14	Ar	Fachada norte/entrada	3,90
	15	Ar	Meio da nave/entrada	3,90
	16	Ar	Fachada sul/entrada	3,90
	17	Ar	Coro	5,30
	18	Ar	Fachada norte/Altar	5,30
	19	Ar	Meio da nave/Altar	5,30
	20	Ar	Fachada sul/Altar	5,30
	21	Ar	Porta sacristia	3,10

Nas figuras 6.22 e 6.23 encontra-se a distribuição dos sensores pela nave principal da igreja em planta e corte, respetivamente.

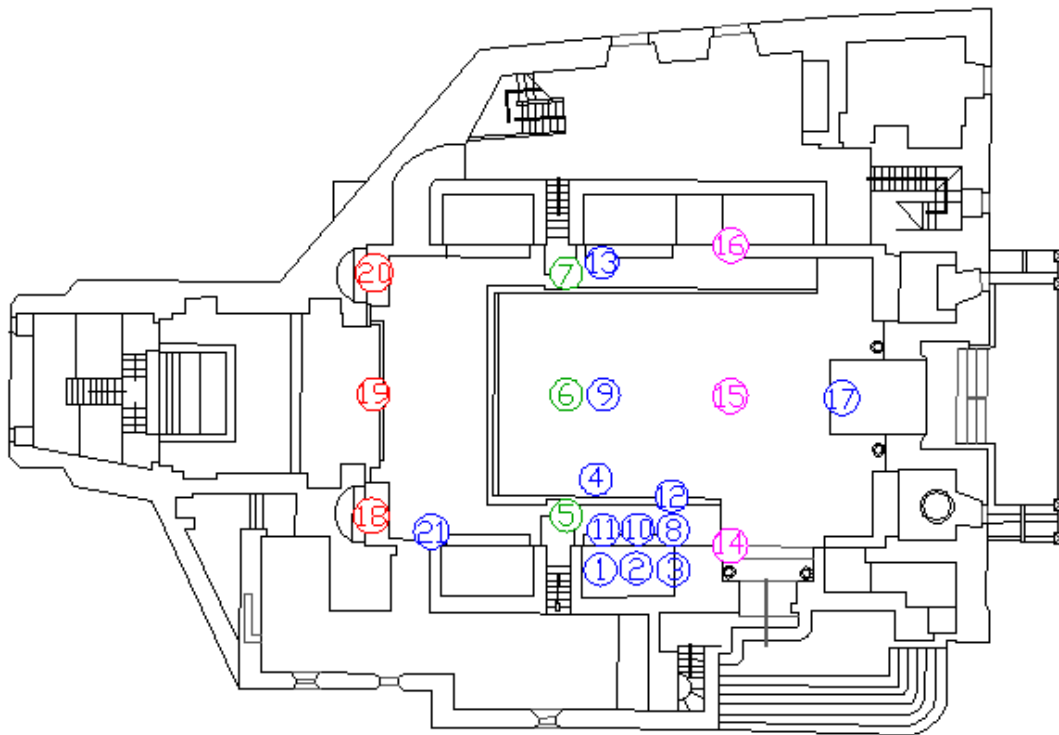


Figura 6.22 – Planta da distribuição dos sensores pela igreja [adaptada de 34]

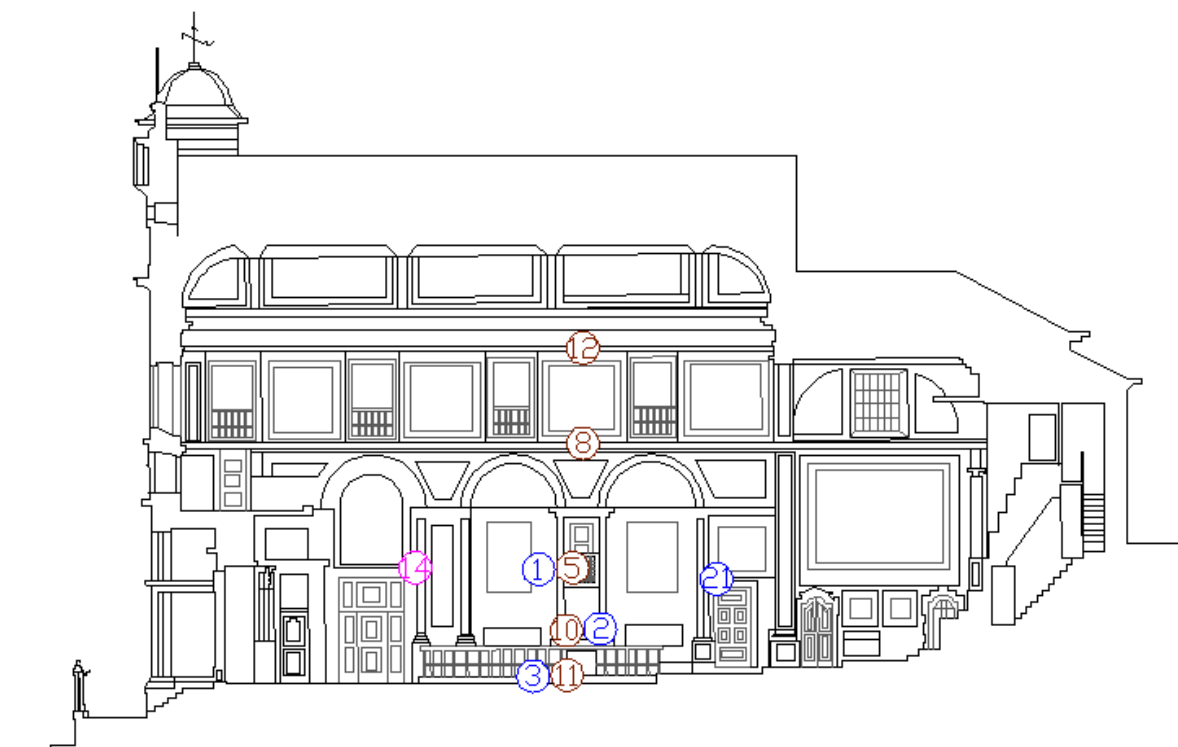


Figura 6.23 – Corte longitudinal com distribuição dos sensores pela igreja [adaptada de 34]

Esta distribuição possibilitou realizar o controlo da temperatura do ar ao longo de quatro alinhamentos na direcção transversal ao altar, dois a uma altura de 3,90m, um a uma altura de 5,30m e outro a 7,50m. Possibilita também o controlo segundo um alinhamento vertical junto do púlpito norte, a uma altura de 0,15m, 1,50m, 3,90m, 7,50m e 10m [34,9,10].

Na figura 6.24 é possível observar a distribuição dos sensores pela nave da igreja.



Figura 6.24 – Distribuição dos sensores pela nave principal da igreja

6.3.2.2 Breve descrição das medições realizadas com os sensores Hobo U12-13 e Rotronic Hygrolog

De modo a complementar as medições realizadas na nave principal foram instalados em pontos isolados três Hobo U12-13 e três Rotronic Hygrolog. Estes sensores realizaram medições de temperatura e humidade relativa com um intervalo de 10 minutos.

Também foi efectuada uma numeração destes sensores para facilitar a sua identificação e o tratamento de dados. Neste caso a identificação foi realizada através de uma numeração composta por uma letra maiúscula e um número, em que a letra representa a marca do sensor, “H” para os Hobo U12-13 e o “R” para os Rotronic Hygrolog.

- **Distribuição dos sensores**

A localização destes sensores permitiu efectuar a monitorização da temperatura e humidade relativa em locais mais distantes, visto que valores obtidos por termopares colocados a mais de 10m do receptor não são tidos como fiáveis.

Na tabela 6.2 encontra-se um resumo dos tipos de sensores portáteis existentes, numeração, tipo e local onde foram instalados.

Tabela 6.2 – Distribuição dos sensores Hobo U12-13 e Rotronic pela igreja

	Numeração	Tipo	Localização	
			Espacial	Cota (m)
Hobo U12-13	H2	Ar	Torre Norte	-
	H3	Ar	Púlpito Norte	3,90
	H4	Ar	Altar-mor	-
Rotronic Hygrolog	R1	Ar	Sacristia	1,80
	R2	Ar	Desvão da Cobertura	-
	R3	Ar	Casa Mortuária	2,30

Nas figuras 6.25 e 6.26 encontra-se a disposição destes sensores em planta e em corte, respetivamente.

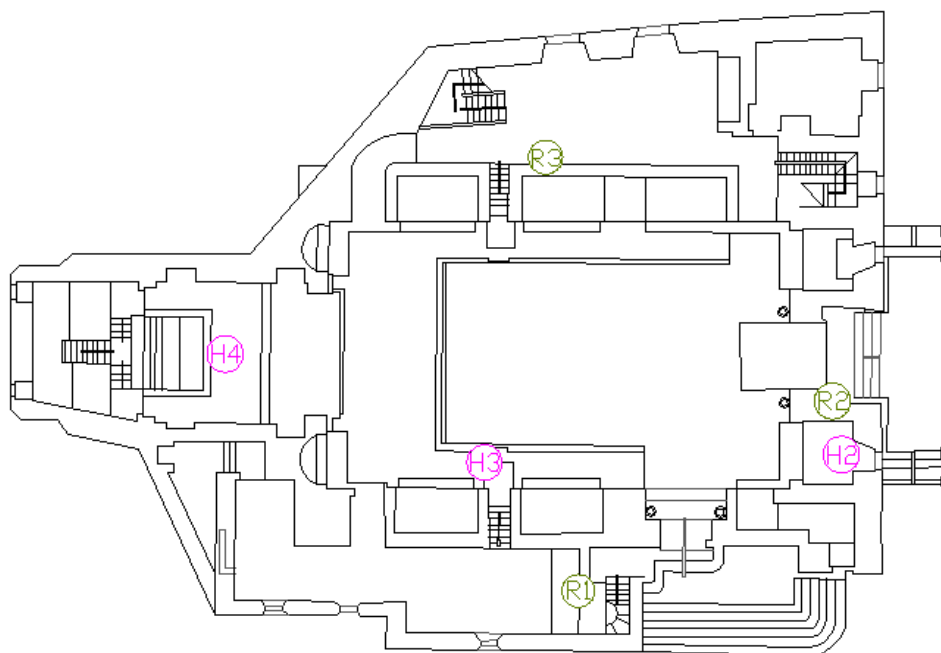


Figura 6.25 – Planta com distribuição dos HOB0 U12-13 e dos Rotronic [adaptada de 34]

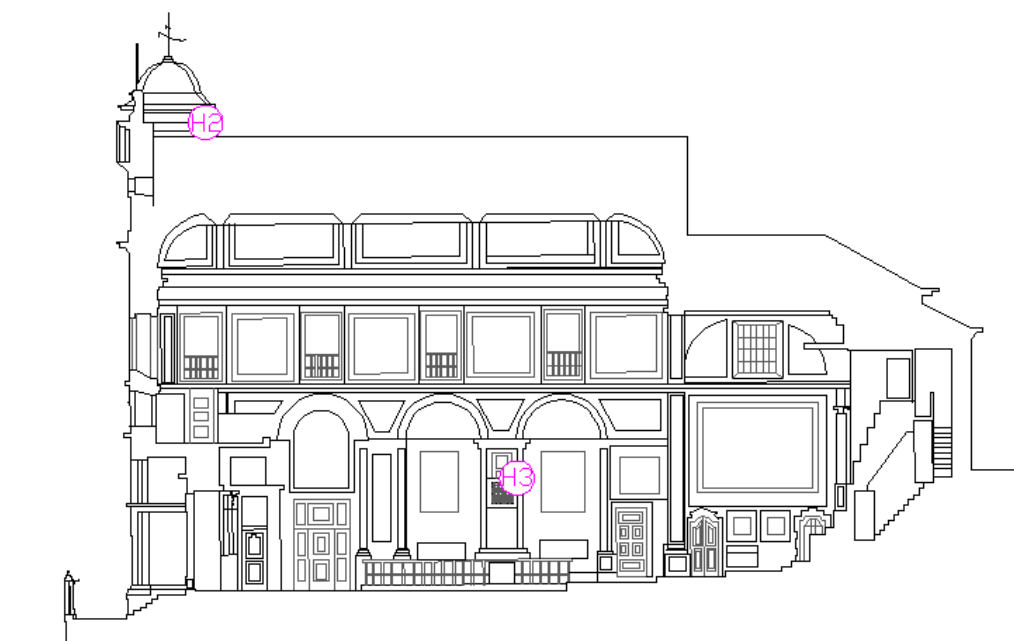


Figura 6.26 – Corte longitudinal com distribuição dos HOB0 U12-13 e dos Rotronic [adaptada de 34]

Os Hobo U12-13 foram colocados no púlpito norte, altar e torre norte, enquanto os Rotronic Hygrolog foram colocados na sacristia, casa mortuária e desvão da cobertura.

6.3.2.3 Tratamento de dados

Os dados obtidos pelo *data logger* são apenas as temperaturas pelo que é necessário calcular a humidade relativa para cada temperatura registados nos termopares.

Como a nave apresenta uma grande dimensão e encontra-se fechada as variações de concentração de vapor de água para um dado instante em diferentes pontos da nave é praticamente nula, pelo que se pode considerar que a concentração de vapor de água para determinado instante é constante ao longo da nave.

Através dos valores das temperaturas (t) obtidos pelos termopares e pela sonda é possível calcular o limite de concentração de vapor de água nesse local, recorrendo à equação 6.1,

$$v_{sat} = 2,2 \times \frac{P_{v,sat}}{273,3 + t} \quad (6.1)$$

em que o valor de $P_{v,sat}$ é obtido pela equação 6.2

$$P_{v,sat} = 611 \times 10^{\left(\frac{7,5t}{273,3+t}\right)} \quad (6.2)$$

Como a sonda também mede a humidade relativa, consegue-se determinar a concentração de vapor de água através da equação 6.3

$$H_r = \frac{v}{v_{sat}} \quad (6.3)$$

em que o limite de concentração de água é obtido pela equação 6.1.

Deste modo, através da equação 6.3, consegue-se saber o valor da humidade relativa para todos os pontos onde se encontra um termopar, ou seja, consegue-se saber a humidade relativa para todos os pontos onde se conhece a temperatura.

No caso dos Hobo U1213 e dos Rotronic Hygrolog não é necessário determinar qualquer valor visto que estes dispositivos medem a temperatura e a humidade relativa.

Após a recolha dos dados e a determinação de todos os parâmetros essenciais são realizados gráficos, com o intuito de se realizar uma avaliação da variação da humidade relativa e temperatura ao longo do tempo.

6.3.3 Monitorização manual

Para a realização do presente estudo, além da monitorização automática das condições higrotérmicas do interior da igreja também se realizaram medições manuais. Essas medições foram efectuadas com recurso ao aparelho de medição de temperaturas superficiais, à câmara de termografia e a um Hobo U12-13.

6.3.3.1 Descrição das medições

Nos dias 1 Fevereiro, 4 Março, 26 Março e 20 de Abril de 2013 realizou-se um conjunto de medições de temperaturas superficiais, com o intuito de aferir se as “gotas de água” visíveis nas paredes e pavimento da nave principal se deveriam a condensações superficiais.

Para tal foram definidos diversos pontos ao longo da nave principal, localizados principalmente em zonas onde era visível a aparecimento das “gotas de água”. Para fácil identificação do local onde se efectuaram as medições identificou-se o local com uma numeração de 1 até 17.

Na tabela 6.3 encontra-se um resumo dos pontos onde se efectuaram as medições.

Tabela 6.3 – Localização dos pontos de medição das temperaturas superficiais

Numeração	Local	Altura (m)
1	Pavimento – Degrau Norte	0,15
2	Pavimento	0,00
3	Fachada Norte - Púlpito	1,00
4	Fachada Norte - Entrada	3,90
5	Fachada Norte - Púlpito	3,90
6	Fachada Sul – Púlpito	3,90
7	Fachada Sul - Entrada	3,90
8	Pavimento - Entrada	0,00
9	Pavimento – Degrau Sul	0,15
10	Corredor	1,5
11	Início do Altar - Sul	1,5
12	Início do Altar - Norte	1,5
13	Início do Altar - Pavimento	0,15
14	Altar - Pavimento	0,30
15	Altar Norte	2,15
16	Altar Sul	2,15
17	Pavimento Altar	0,45

Antes de cada registo deixou-se repousar no aparelho durante 2 minutos no local de medição para aumentar a coerência dos resultados.

Na figura 6.27 encontra-se a localização, em planta, dos locais onde se efectuaram as medições.

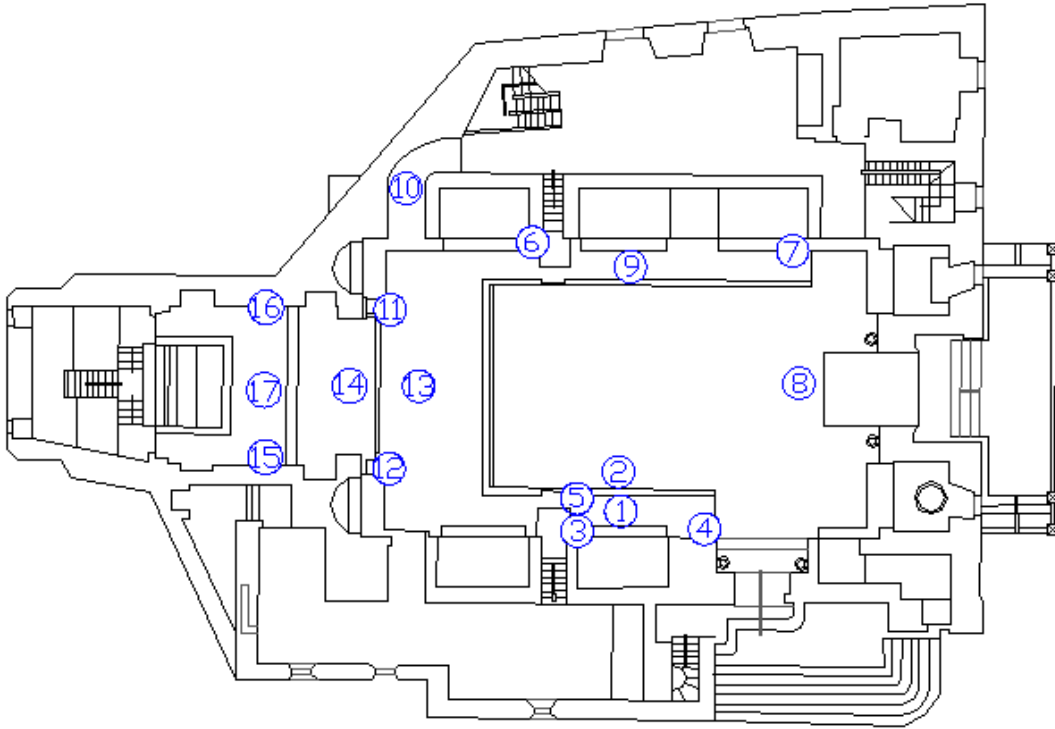


Figura 6.27 – Planta com identificação dos pontos de medição das temperaturas superficiais
[adaptada de 34]

Nos dias 18 Janeiro e 24 de Abril de 2013, realizou-se um conjunto de medições com recurso a um Hobo U12-13 em 34 pontos em planta e 4 alturas distintas. Estas medições têm como objectivo analisar de modo mais preciso as condições higrotérmicas do clima interior da igreja.

Na figura 6.28 encontra-se a marcação em planta de todos os pontos definidos.

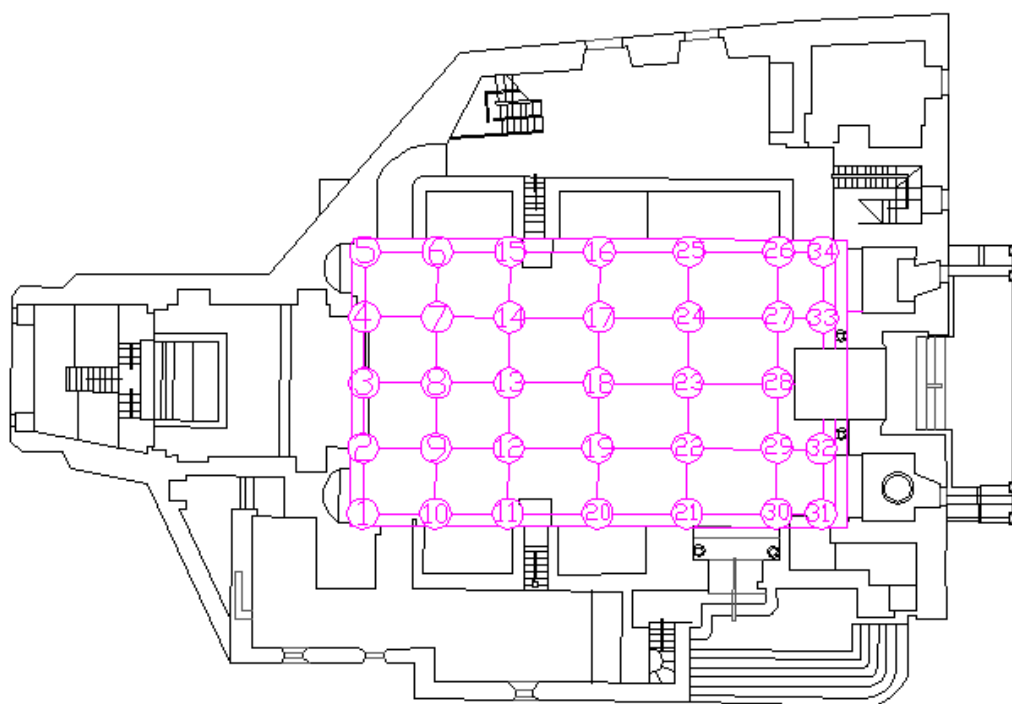


Figura 6.28 – Planta com identificação dos pontos de medição com recurso ao HOBO U12-13 [34]

A malha definida apresenta um afastamento de 2,10m entre todos os pontos transversais ao altar. No caso do afastamento entre pontos longitudinais ao altar o espaçamento entre os pontos não é constante, existindo um afastamento de 2,35m, 2,90m e 1,45m. Para cada ponto realizaram-se medições em diversas alturas, a 0,15m, a 2,85m, a 6,45m e a 10,95m, relativamente ao pavimento.

Na realização destas medições utilizou-se um Hobo U12-13 e um balão meteorológico com 80cm de diâmetro. O aparelho de medição foi fixo ao balão e este a um fio de nylon com marcações para as alturas definidas. Encheu-se o balão com hélio, pois como o hélio tem uma densidade inferior à do ar faz com que o balão suba.

Para cada ponto efetuaram-se leituras de 3 em 3 segundos durante um minuto, obtendo-se no total 16 medições para cada ponto. Antes de iniciar as medições deixou-se o aparelho repousar no local durante 2 minutos deixando-o estabilizar e ultrapassar o seu tempo de resposta.

Nos dias 4 Março, 26 de Março e 24 de Abril de 2013 captaram-se imagens com a câmara de termografia. A emissividade para uma pedra calcária varia entre 0,85 e 0,95 [29]. Para estes valores de emissividade as temperaturas obtidas afastavam-se muito das temperaturas obtidas pelos sensores superficiais. Assim, foi definida uma emissividade de 0,96, pois era com esta emissividade que as temperaturas captadas pela câmara se aproximavam das temperaturas superficiais obtidas pelo *data logger*.

6.3.3.2 Tratamento de dados

Após se obter os dados das temperaturas superficiais foram obtidas as humidades relativas do mesmo modo que se encontra descrito da secção 6.3.2.3.

Relativamente aos dados obtidos pelo Hobo U12-13, para cada ponto foi calculada a média e das 16 medições realizadas para cada altura. Esses valores permitiram obter mapas de isolinhas e representações tridimensionais através do programa *Surfer* da Golden Software [28].

De modo a aumentar o rigor dos traçados dos mapas foi utilizado um processo de interpolação denominado como método de Krigagem linear, com uma malha de 0,15cm.

As imagens obtidas pela câmara de termografia foram descarregadas para um computador com recurso ao programa *Therma Cam connect 3* e posteriormente abertas através do programa *Therma Cam Quik View*.

Capítulo 7

Análise e discussão de resultados

O presente estudo consistiu na caracterização e análise das condições higrotérmicas no interior da igreja de São Cristóvão em Lisboa.

Para a caracterização do microclima interior da igreja foram recolhidas medições de temperatura e humidade relativa no interior e no exterior da igreja. De forma a completar estas medições foram realizadas, esporadicamente, medições com o aparelho de medição de temperaturas superficiais. Nos dias 18 de Janeiro e 24 de Abril de 2013 realizou-se uma bateria de leituras, como já descrito anteriormente, com recurso ao HOBO U12-13.

Para a análise de dados optou-se, inicialmente, por apresentar uma análise ao longo de todo o período de recolha de dados. Posteriormente, com o intuito de aprofundar a análise apresentam-se gráficos de uma semana por cada estação do ano.

A bateria de dados realizada com recurso ao Hobo U12-13 permitiu a realização de mapas de isolinhas e gráficos tridimensionais, para a temperatura e humidade relativa.

As medições obtidas através do aparelho de medição de temperatura superficial serão apresentadas em tabela e complementados através das imagens captadas pela câmara de termografia.

7.1 Monitorização automática

7.1.1 Análise Geral

A monitorização automática realizou-se no período compreendido entre o dia 1 de Novembro de 2012 e o dia 16 de Julho de 2013.

Na figura 7.1 encontra-se representado a evolução da temperatura no exterior, desvão da cobertura, e no interior da igreja e na figura 7.2 encontra-se representado a evolução da média móvel da temperatura no exterior, desvão da cobertura e no interior da igreja segundo a EN15757:2010 [37]. O sensor do interior é o termopar colocado no centro da nave da igreja a 3,90m de altura.

Tal como seria de esperar observa-se através da figura 7.1 que é no exterior que se verificam as maiores variações, tanto nos ciclos diários como no ciclos sazonais, enquanto no interior

da igreja as variações de temperatura são menos acentuadas devido á inercia térmica do edifício.

Verifica-se que a temperatura exterior apresenta uma tendência decrescente até ao dia 18 de Fevereiro, no qual se inverte essa tendência e passa a existir uma tendência ascendente.

As temperaturas no desvão da cobertura uma tendência em acompanhar as variações existentes no exterior. No entanto os ciclos existentes no desvão são menos sinuosos devido à resistência térmica da cobertura. Verifica-se também a influencia da inercia térmica pois existe um desfaseamento e amortecimento entre os picos máximos e mínimos.

No interior da igreja as temperaturas apresentam uma tendência decrescente até ao dia 1 de Março de 2013. A partir do dia 1 de Março a temperatura apresenta uma tendência crescente. Devido á elevada inercia térmica da igreja verifica-se que as variações de temperatura são menos acentuadas no interior do que no exterior, assim como que durante as estações de Outono/Inverno a temperatura interior é superior à temperatura exterior e nas estações de Primavera/Verão a temperatura no interior é menor do que a temperatura no exterior.

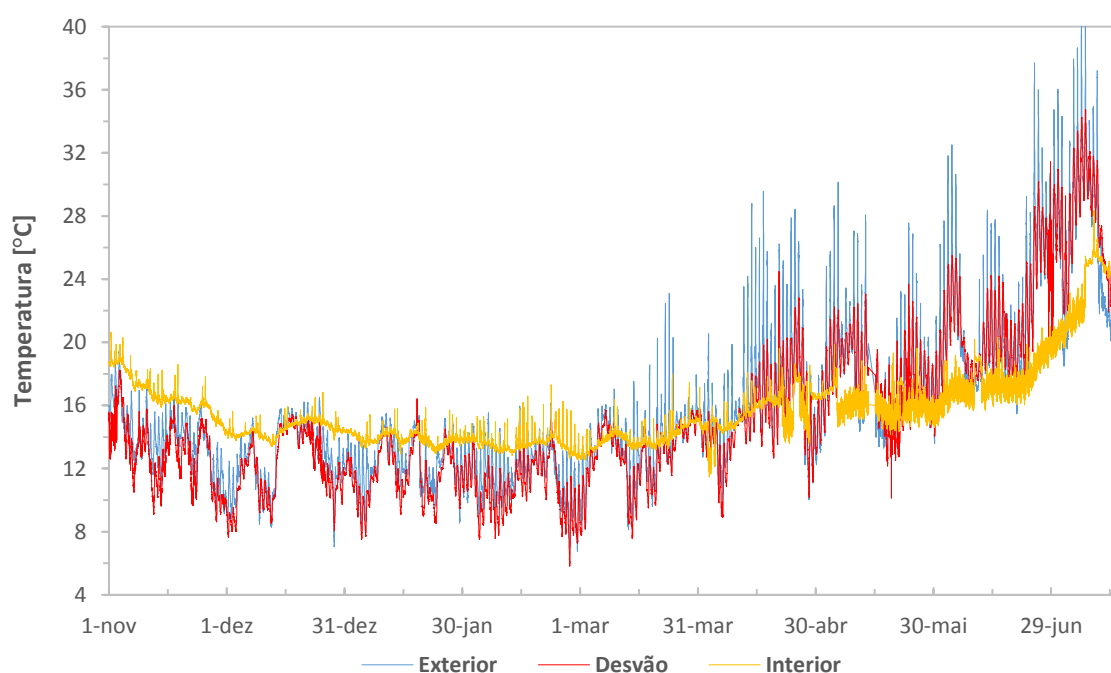


Figura7.1 – Evolução da temperatura no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

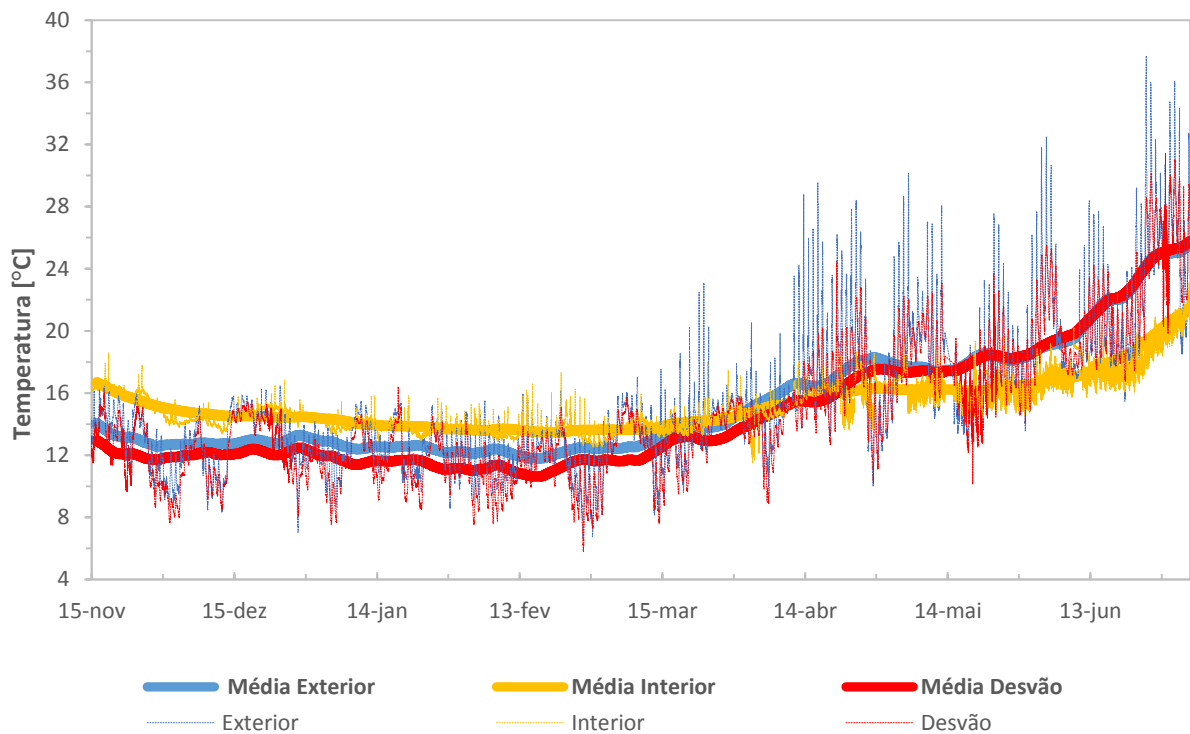


Figura 7.2 – Evolução média móvel da temperatura no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 15 de Novembro de 2012 e 2 de Julho de 2013

Na figura 7.3 encontra-se representado a evolução da humidade relativa no exterior, desvão da cobertura, e no interior da nave da igreja a 3,90m e na figura 7.4 encontra-se representado a evolução da média móvel da humidade relativa no exterior, desvão da cobertura e no interior da igreja segundo a EN15757:2010 [37].

A humidade relativa do exterior apresenta valores muito elevados até ao dia 31 de Março, sendo o seu valor máximo de 95,8%. A partir do dia 31 de Março as humidades relativas começam a baixar, sendo o menor valor registado 18,44% no mês de Julho.

A humidade relativa no desvão acompanha a tendência exterior e apresenta valores médios superiores aos valores obtidos no exterior, excepto nos períodos compreendidos entre 15 e 23 de Dezembro de 2012 e de 10 de Julho a 18 de Julho de 2013. Durante o mês de Janeiro existem valores muito próximos da saturação, sendo o valor máximo registado de 99,8%, devido à fraca ventilação.

O interior da igreja acompanha as tendências do exterior mas apresenta valores mais baixos. Em certos períodos ultrapassa os 80%, principalmente quando a humidade relativa no exterior é mais elevada, chegando a atingir o máximo de 98,8%.

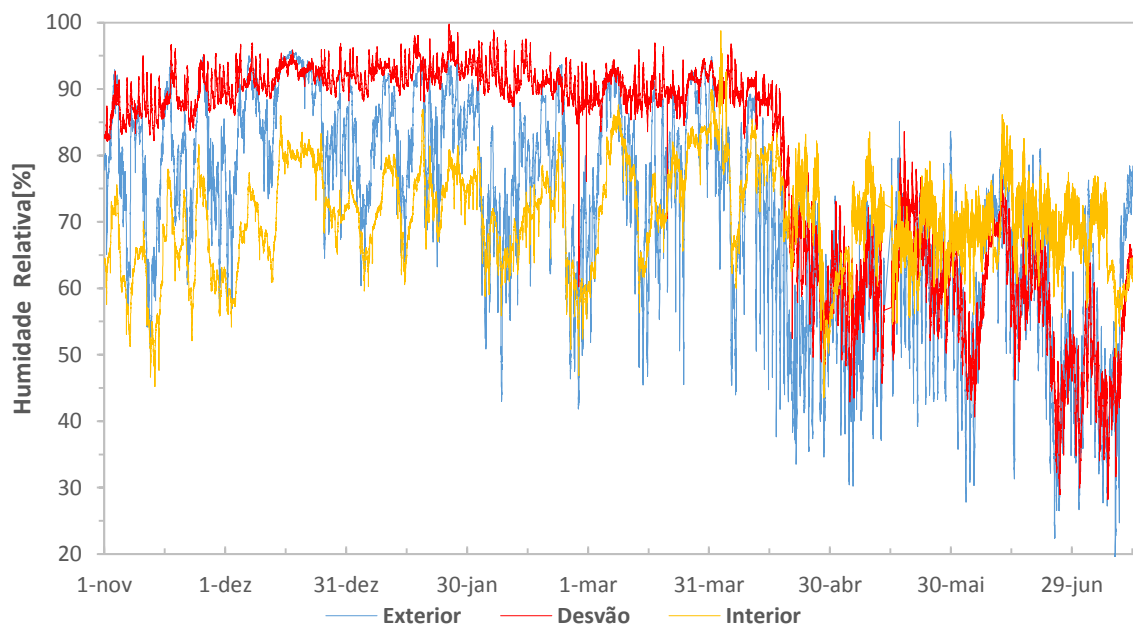


Figura 7.3 – Evolução da humidade relativas no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

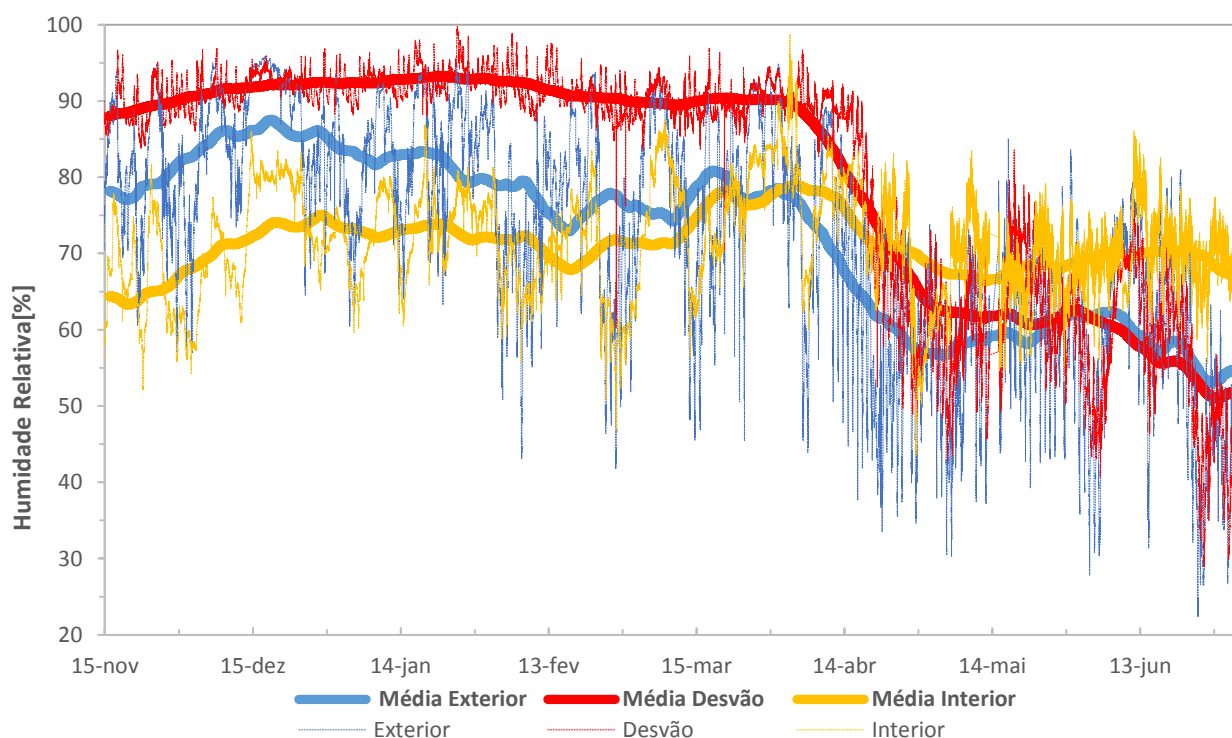


Figura 7.4 – Evolução da média móvel humidade relativas no interior, exterior e no desvão da cobertura entre o período compreendido entre 15 de Novembro de 2012 e 2 de Julho de 2013

Nas figuras 7.5 e 7.6 encontra-se a evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores localizados no centro da nave, altar, na sacristia e na casa mortuária, respectivamente

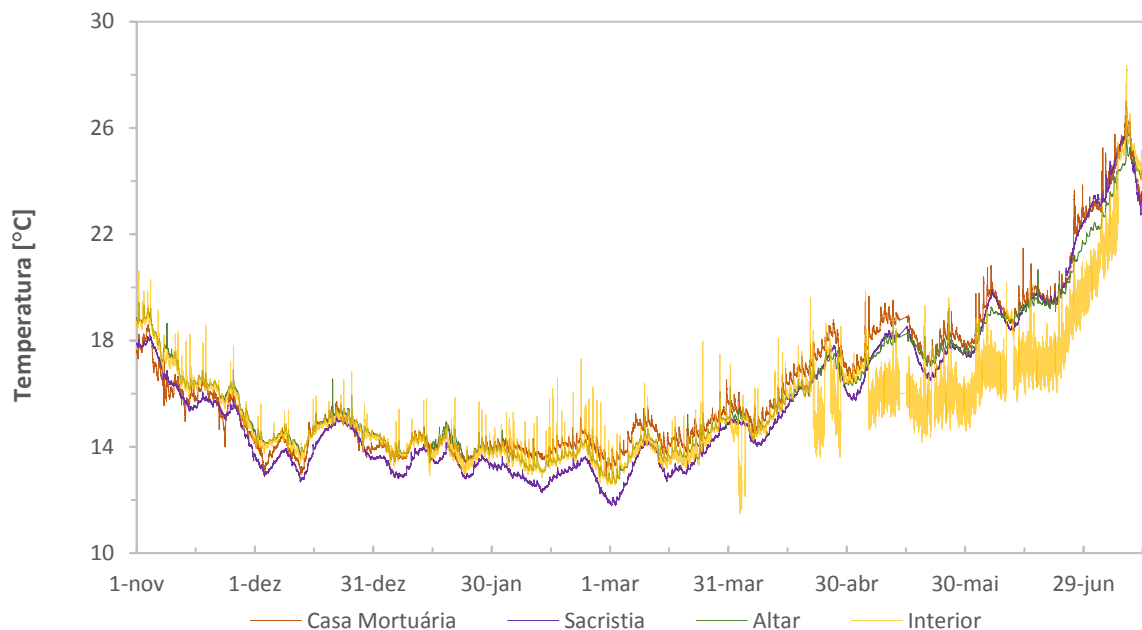


Figura 7.5 – Evolução da temperatura no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no altar, na sacristia e na casa mortuária entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

Verifica-se que na casa mortuária registam-se temperaturas superiores às da sacristia, devido ao facto de a casa mortuária se encontrar orientada a sul e a sacristia orientada a norte recebendo menos radiação solar directa. É ainda de salientar que zona norte da igreja encontra-se mais encoberta pelos edifícios circundantes do que a zona orientada a sul.

Até ao dia 18 de Abril a sacristia é a zona mais fria do edifício, tal como se referiu anteriormente, justificado pelo facto de se encontrar orientada a Norte. No período compreendido entre o dia 18 de Abril e 7 de Julho é na nave principal que se registam os valores mais baixos devido a esta se encontrar no centro do edifício não sendo tão influenciada quanto a sacristia e a casa mortuária pelas temperaturas exteriores. As temperaturas registadas no altar-mor acompanham as tendências das temperaturas da nave principal, mas são superiores às na nave. Quando a 7 de Julho as temperaturas exteriores diminuem as temperaturas interiores acompanham a tendência, mas as temperaturas mais elevadas passam a ser as da nave principal, seguindo-se o altar-mor, a casa mortuária e a sacristia.

Até ao dia 15 de Abril os valores do altar-mor são superiores aos registados na sacristia, mas a partir dessa data começa a existir uma maior proximidade entre as temperaturas da sacristia e do altar-mor, sendo as temperaturas do altar-mor inferiores às da sacristia em diversos intervalos de tempo. Também se verifica as temperaturas no altar-mor são superiores às temperaturas na casa mortuária até 27 de Janeiro, passando a partir dessa data a serem inferiores. Isto pode-se dever ao facto de o altar-mor se encontrar enterrado, dispondo de maior inércia térmica do que a sacristia e a casa mortuária, tornando as temperaturas mais baixas que nas outras duas divisões durante o período de Primavera/Verão.

No que respeita à humidade relativa verificou-se que até ao dia 18 de Abril na sacristia registam-se os maiores valores de humidade relativa e no interior da nave principal os menores valores, sendo no altar-mor e na casa mortuária registados os valores intermédios. A partir dessa data a humidade relativa na sacristia e na casa mortuária começam a diminuir, enquanto na nave principal e no altar-mor começa a aumentar, sendo os valores mais elevados registados no altar-mor. O facto de o altar-mor apresentar valores mais elevados deve-se à presença de pessoas durante as celebrações religiosas e ao facto de ser uma zona pouco ventilada, pelo que não ocorre dissipação de humidade.

O maior pico de humidade relativa foi no dia 2 de Abril na nave principal com um valor de 98,99 %.

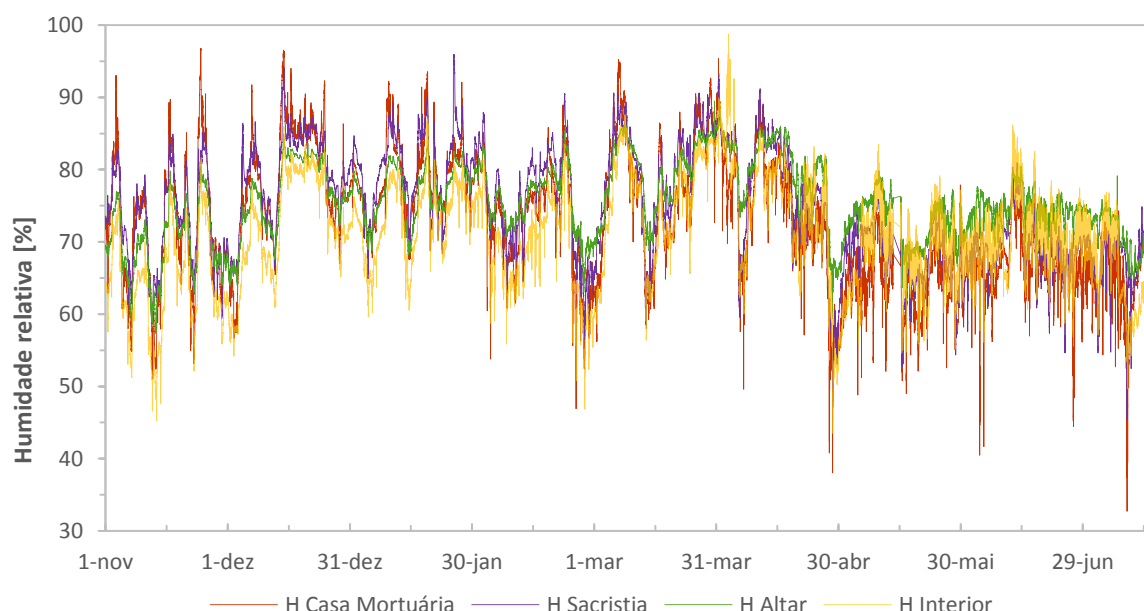


Figura 7.6 – Evolução da humidade relativa no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no altar, na sacristia e na casa mortuária entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

Comparando a figura 7.1 e 7.3 com a figura 7.5 e 7.6, respectivamente, verifica-se que as temperaturas e humidades relativas dos sensores colocados no interior na igreja apresentam tendência em acompanhar as variações existentes no exterior.

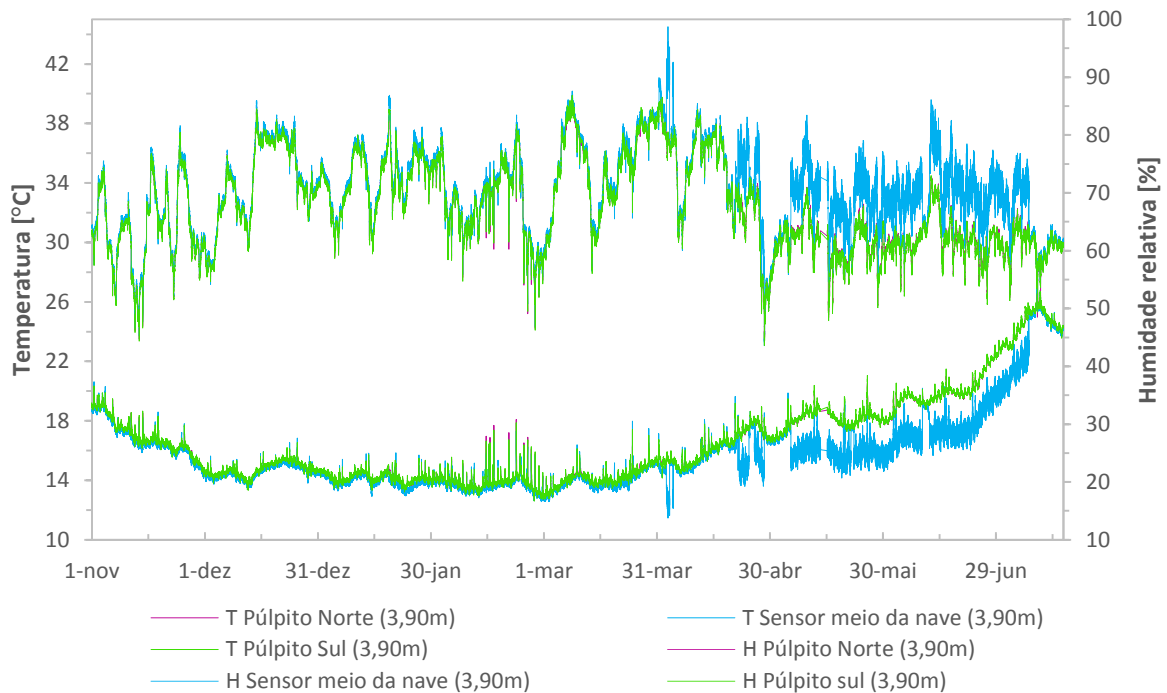


Figura 7.7 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no púlpito norte e no púlpito sul a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

Na figura 7.7 apresenta-se a evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de um corte transversal na nave principal da igreja a 3,90m de altura. O corte é composto pelo sensor T5 colocado junto do púlpito norte, o T6 colocado a meio da nave e o T7 colocado no púlpito sul.

Relativamente à temperatura os sensores apresentam um andamento bastante semelhante, excepto a partir do dia 30 de Março onde as temperaturas do sensor localizado no centro da nave se começam a afastar das temperaturas dos sensores dos púlpitos. Até ao dia 12 de Dezembro aos sensores apresentam uma tendência decrescente. No período compreendido entre 12 de Dezembro e 25 de Dezembro a tendência inverte-se devido às celebrações da época natalícia que contêm uma elevada presença de pessoas com velas aumentando a temperatura no interior da igreja. A partir do dia 25 de Dezembro a tendência inverte-se novamente até ao dia 3 de Março, onde passam a ter um andamento crescente.

Durante todo o período, é no sensor colocado no centro da nave que se registam as temperaturas mais baixas, justificado pela sua maior interioridade e pelo facto de os sensores localizados nos púlpitos se encontrarem mais próximos das paredes exteriores sofrendo uma maior influencia das condições climáticas exteriores. O sensor localizado no púlpito sul regista temperaturas superiores às verificadas no púlpito norte devido à sua maior exposição solar.

O sensor localizado no meio da nave, T6, a partir do dia 30 de Março começa a registar temperaturas bastante mais baixas do que as registadas no púlpito norte e no púlpito sul. Este afastamento deve-se aos sensores localizado nos púlpitos sofrerem uma maior influencia das condições climatéricas exteriores, verificando-se neste período um aumento da temperatura

exterior, e com à interioridade do sensor no centro da nave dificultando que este acompanhe as condições climáticas exteriores.

Para a humidade relativa verifica-se que os sensores têm andamentos muito semelhantes entre si, verificando-se que quando a temperatura aumenta a humidade relativa apresenta comportamento contrário, ou seja diminui devido ao facto de se considerar que a humidade absoluta na nave principal é constante. Os maiores valores de humidade relativa são registados a meio da nave principal e os menores no púlpito sul.

No período compreendido entre dia 12 e 25 de Dezembro existe um aumento da humidade relativa devido aos festejos da época natalícia que contam maior número com pessoas no interior da igreja aumentando a produção de vapor de água.

Quando a 30 de Março as temperaturas no centro da nave principal se afastam das temperaturas dos outros dois sensores, a humidade relativa também se afasta, mas neste caso obtém valores superiores aos dos outros dois sensores.

Os valores de pico foram registados no sensor T6, ou seja, no sensor localizado no centro da nave principal sendo o valor máximo de 98,8% e o valor mínimo de 43,5%.

Na figura 7.6 apresenta-se a evolução das temperaturas e humidades relativas ao longo de um corte transversal na nave principal da igreja a 7,50m de altura. O corte é composto pelo sensor T8 colocado junto do púlpito norte, o T9 colocado a meio da nave e o T13 colocado no púlpito sul.

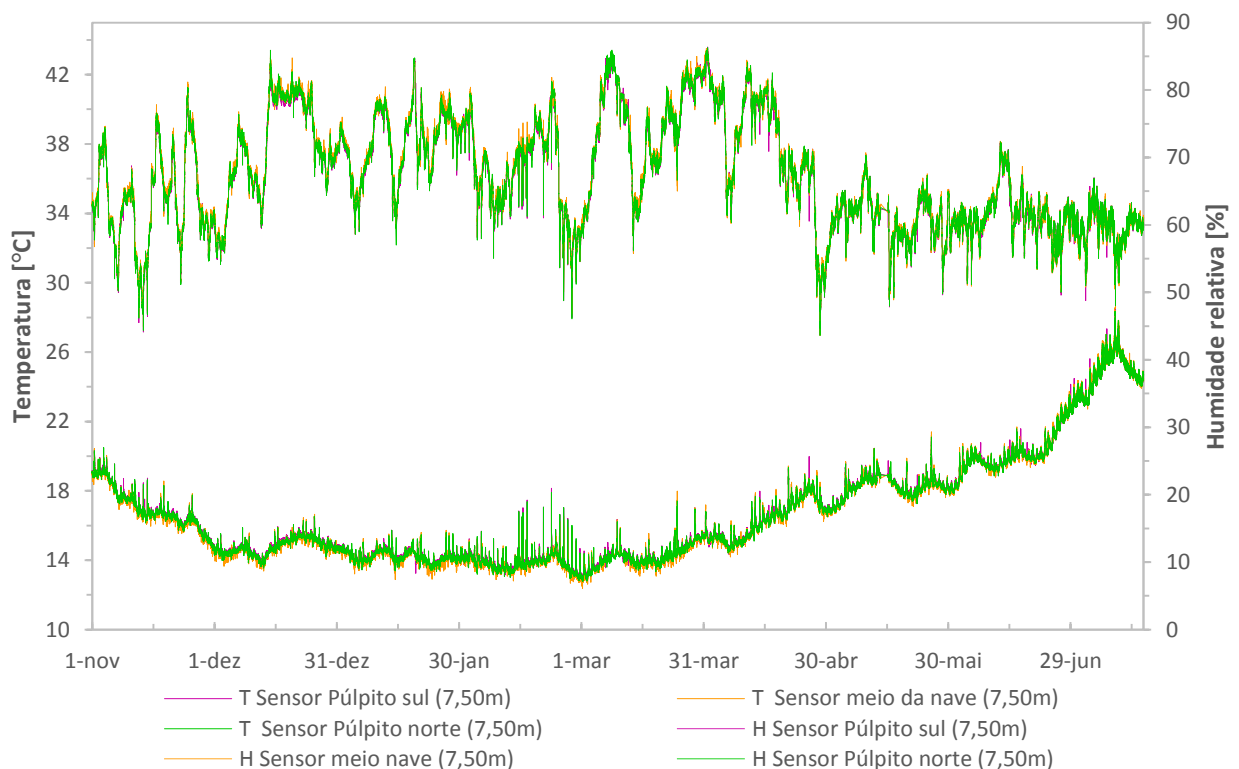


Figura 7.8 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores colocados, no centro da nave principal no púlpito norte e no púlpito sul a 7,50 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

As temperaturas registadas nos diferentes sensores apresentam as mesmas tendências e variações ao longo do período em análise. Tal como os sensores representados na figura 7.5 estes apresentam uma tendência decrescente até ao dia 12 de Dezembro, onde se inverte e passa a ser crescente até ao dia 25 de Dezembro devido as celebrações natalícias. A partir de dia 25 de Dezembro a tendência é novamente decrescente invertendo-se a dia 3 de Março.

À semelhança do corte transversal a 3,90m é no sensor localizado no centro da nave principal que se registam as temperaturas mais baixas justificado pela sua interioridade e pelo facto de os sensores localizados junto das paredes exteriores sofrerem uma maior influência das condições climáticas exteriores. Também é no sensor localizado a sul que se registam as temperaturas mais elevadas justificado pelo facto de a igreja se encontrar mais exposta à radiação solar directa na fachada sul.

No corte transversal a 3,90 m (figura 7.5) existe um afastamento das temperaturas entre o sensor localizado no centro da nave e os localizados nos púlpitos, sendo a sua causa justificada anteriormente. No corte transversal a 7,50 m verifica-se que não existe afastamento entre as temperaturas registadas nos sensores localizados nas fachadas e o sensor localizado no centro da nave, devido ao facto de este sofrer influência das condições climáticas exteriores através da cobertura.

Em termos de humidade relativa verifica-se que os sensores têm andamentos muito semelhantes entre si, sendo o seu comportamento inverso às variações de temperatura como já referido anteriormente.

À semelhança do corte transversal localizado a 3,90m existe no entre o dia 12 e 25 de Dezembro um aumento da humidade relativa devido aos festejos da época natalícia que contam com pessoas no interior da igreja aumentando a produção de vapor de água.

Durante todo o período verifica-se que a humidade relativa das condições de saturação, nunca existindo valores superiores a 90,0%.

Na figura 7.9 apresenta-se a evolução das temperaturas e humidades relativas ao longo de um corte transversal na nave principal da igreja a 3,90m de altura, mas neste caso o corte é composto pelo sensor T14 colocado na fachada norte, o T15 colocado a meio da nave e o T17 colocado na fachadasul, junto da entrada principal. Durante o período de análise ocorreram interrupções no registo de leituras do sensor localizado no centro da nave principal (T 15) no período compreendido entre 6 Janeiro e 2 de Fevereiro e de 12 Junho a 16 Julho devido a problemas com o termopar.

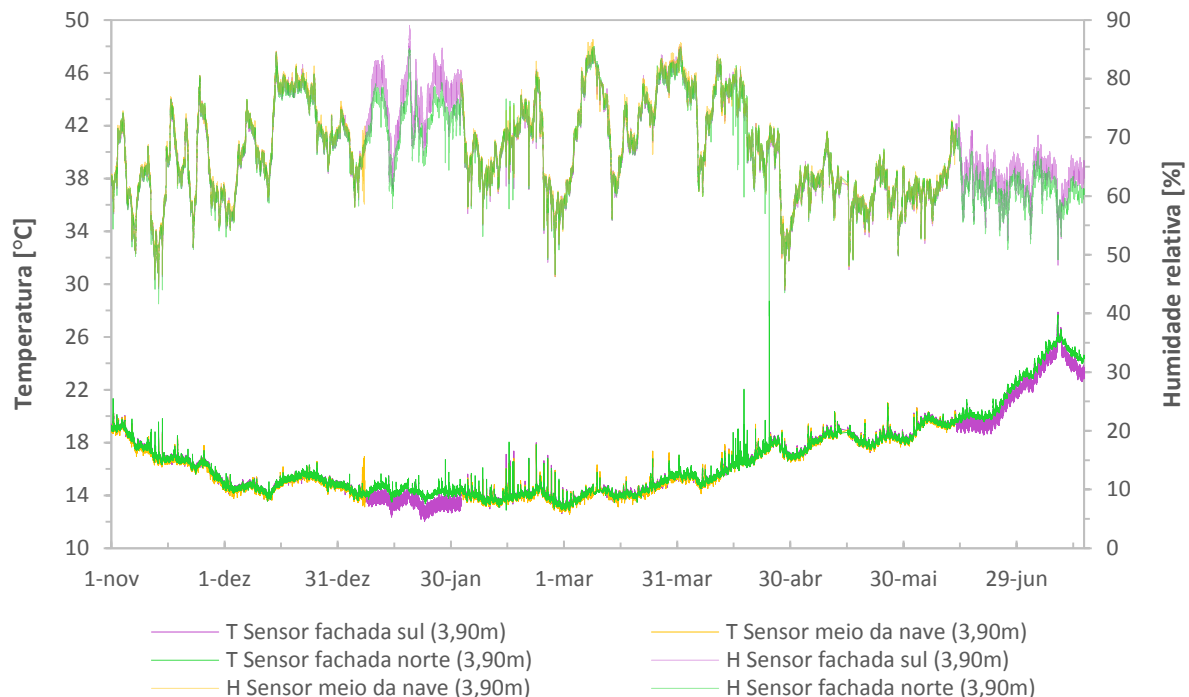


Figura 7.9 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior para os sensores colocados, na fachada norte, fachada sul e meio da nave junto à entrada a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

As temperaturas registadas nestes sensores apresentam andamentos bastante semelhantes ao longo de todo o período. Este corte transversal também apresenta uma tendência decrescente até ao dia 12 de Dezembro, onde se inverte e passa a ser crescente até ao dia 25 de Dezembro devido às celebrações natalícias. A partir de dia 25 de Dezembro a tendência é novamente decrescente invertendo-se a dia 3 de Março.

É no sensor localizado no centro da nave principal que se registam as temperaturas mais baixas devido à sua interioridade, à semelhança do que foi referido para os cortes representados nas figuras 7.5 e 7.6. Também é, tal como se verifica nos cortes representados nas figuras 7.5 e 7.6, no sensor localizado na fachada sul que se verificam as temperaturas mais altas durante o período em análise excepto de entre 6 de Janeiro e 1 de Fevereiro e de 11 Junho a 16 Julho.

As humidades relativas registadas apresentam variações idênticas nos três sensores ao longo do estudo, sendo o valor máximo de 88,5%, ou seja nunca se verificam as condições de saturação. As humidades relativas mais elevadas foram registadas a meio da nave principal, ou seja, no sensor T15.

Na figura 7.10 encontra-se representado as evoluções da temperatura e da humidade relativa junto ao púlpito norte ao longo de uma coluna vertical composto pelos termopares T11, T5, T8 e T12 que se encontram colocados a alturas referentes ao pavimento de 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m.

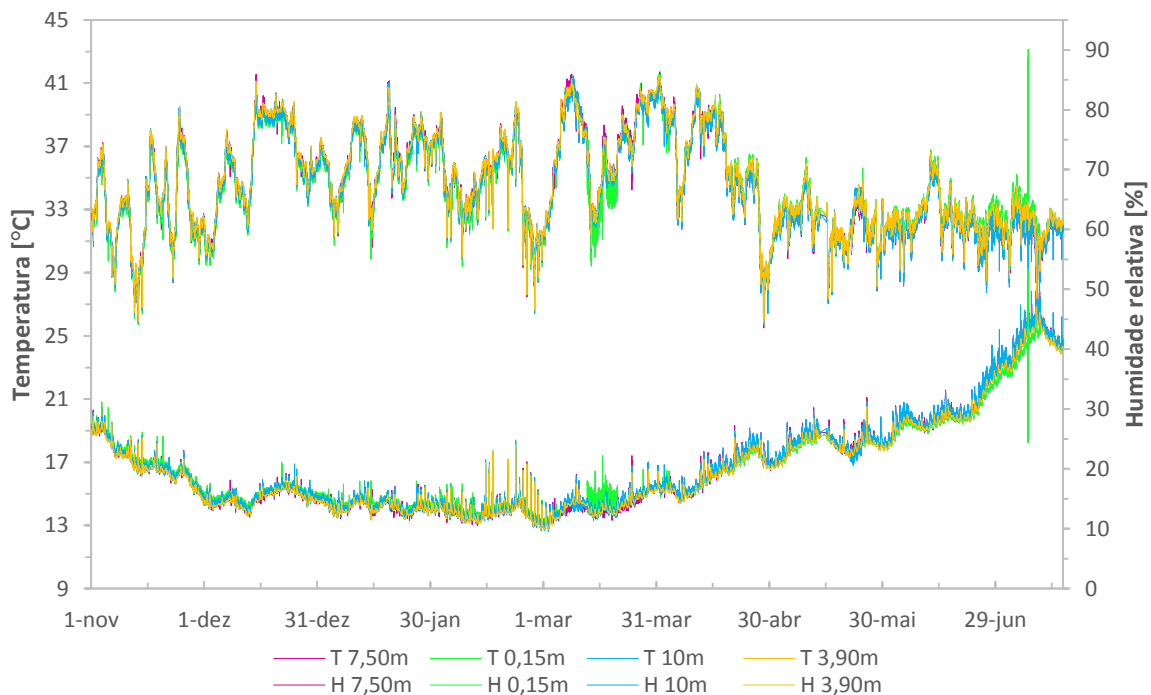


Figura 7.10 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte a 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

As temperaturas registadas pelos sensores apresentam andamentos bastante semelhantes ao longo de todo o período. Verifica-se que até ao dia 13 de Dezembro existe uma tendência decrescente. No período compreendido entre 13 e 25 de Dezembro a tendência decrescente inverte-se e passa a ser existir um andamento crescente devido às celebrações natalícias existentes na igreja. A partir do dia 25 de Dezembro a tendência crescente inverte-se, ou seja, passa a existir um andamento decrescente até ao dia 1 de Março onde se inverte novamente a tendência passando a existir andamento crescente até ao final do período em análise.

Até ao dia 27 de Abril as temperaturas obtidas no sensor colocado a 0,15 m são superiores às temperaturas obtidas a 10,00 m, justificado pelo facto de o sensor colocado a 10,00 m se encontrar próximo da cobertura que no período Outono/Inverno se encontra mais fria devido ao seu contacto com o exterior. A partir de 27 de Abril as temperaturas do sensor colocado a 10,00 m aumentam, e passam a ser superiores às temperaturas do sensor a 0,15m. Este facto é justificado por a 27 de Abril as temperaturas exteriores apresentarem uma tendência crescente aumentando a temperatura da cobertura, o que origina o aumento de temperaturas do sensor a 10,00m.

Os sensores colocados a 3,90m e a 7,50 m são onde se registam os valores de temperaturas intermédias, sendo que as temperaturas do 3,90 m são menores do que as temperaturas registadas a 7,50 m.

Até dia 27 de Abril o ar não se encontra estratificado por temperaturas, pois a temperatura junto da cobertura é inferior à temperatura do pavimento devido ao facto de o pavimento ainda conter calor armazenado durante o Verão e a cobertura se encontrar sobre influência das condições climáticas do exterior. Deste modo, o ar junto do pavimento aquece, diminuindo

a sua densidade o que faz com que suba. Quando este atinge a cobertura arrefece novamente o que aumenta a sua densidade e origina com que desça até ao pavimento, ou seja, geram-se correntes convectivas que impedem a estratificação do ar por temperaturas.

Como as temperaturas exteriores já se encontram em andamento crescente desde 26 de Fevereiro, a 27 de Abril as temperaturas na cobertura ultrapassam as temperaturas registadas junto do pavimento pois este ainda se encontra sofre a influência das baixas temperaturas durante o Outono/Inverno. Assim a cobertura apresenta uma temperatura mais elevada do que o pavimento, logo o ar junto da cobertura encontra-se com uma temperatura superior ao ar junto do pavimento existindo estratificação do ar por temperaturas que variam de forma crescente desde o pavimento até à cobertura.

Em termos de humidade relativa todos os sensores apresentam a mesma tendência, existindo apenas pequenas variações entre si. A humidade relativa não ultrapassa os 90% nem é inferior a 40%, sendo os valores de pico 90,1% e 41,3%. No período Outono/Inverno a humidade relativa a 0,15m é inferior à humidade relativa a 10 m e no período Primavera/Verão o contrário. Durante a estação Outono/Inverno existe variações acentuadas, nomeadamente de 25 de Novembro a 3 de Dezembro, de 7 a 13 de Dezembro, 2 a 7 de Fevereiro e de 9 a 14 de Março, existindo também outras variações mas não tão acentuadas. Também é possível verificar que a 26 de Abril as humidades diminuem de forma acentuada, voltando a subir a 28 de Abril mantendo-se com algumas quedas e subidas, embora menos acentuadas, até ao final do período em análise.

Nas figuras 7.11 e 7.12 encontra-se representado as evoluções da temperatura e da humidade relativa ao longo de um corte longitudinal que passa pelo centro da nave principal composto pelos sensores T6 e T15 colocados a 3,90 m e os sensores T17 e T19 colocados a 5,30 m, respectivamente. Como os sensores foram colocados a alturas diferentes, devido a impossibilidade de os colocar todos à mesma altura, será realizada uma análise dos sensores que se encontram à mesma altura e não dos quatro sensores em simultâneo.

Relativamente aos sensores colocados a 3,90m, ou seja, os sensores colocados no centro da nave principal verifica-se que o sensor T6 (colocado no alinhamento dos dois púlpitos) regista temperaturas inferiores as registadas no T15 justificado pelo facto de o T6 apresentar uma maior interioridade e o T15 se encontrar próximo da porta de entrada e sofrer influencia das condições climáticas exteriores. Devido ao facto de o T15 se encontrar próximo da porta de entrada sofrendo influencia das condições climáticas exteriores seria de esperar que durante a estação de Inverno as suas temperaturas fossem inferiores as temperaturas do T6 mas tal não se verifica.

As humidades relativas destes dois sensores apresentam andamentos bastante semelhantes ao longo do período, sendo as humidades do sensor colocado no alinhamento dos dois púlpitos superiores as do sensor colocado próximo da entrada.

Já nos sensores colocados a uma altura de 5,30 m verifica-se que a temperaturas do sensor colocado junto do altar são inferiores as temperaturas registadas no sensor do coro, excepto no período de 15 de Dezembro a 6 de Abril. Durante este período verifica-se a existência de temperaturas no sensor junto do coro inferiores as temperaturas do sensor junto do altar podendo ser justificado pelo facto de o sensor no coro se encontrar perto do exterior sofrendo influencia do exterior principalmente durante a estação de Inverno. No restante período de

análise o sensor próximo do altar regista as temperaturas mais baixas devido ao facto de se encontrar junto de uma zona enterrada da igreja, ou seja uma zona com maior inercia térmica.

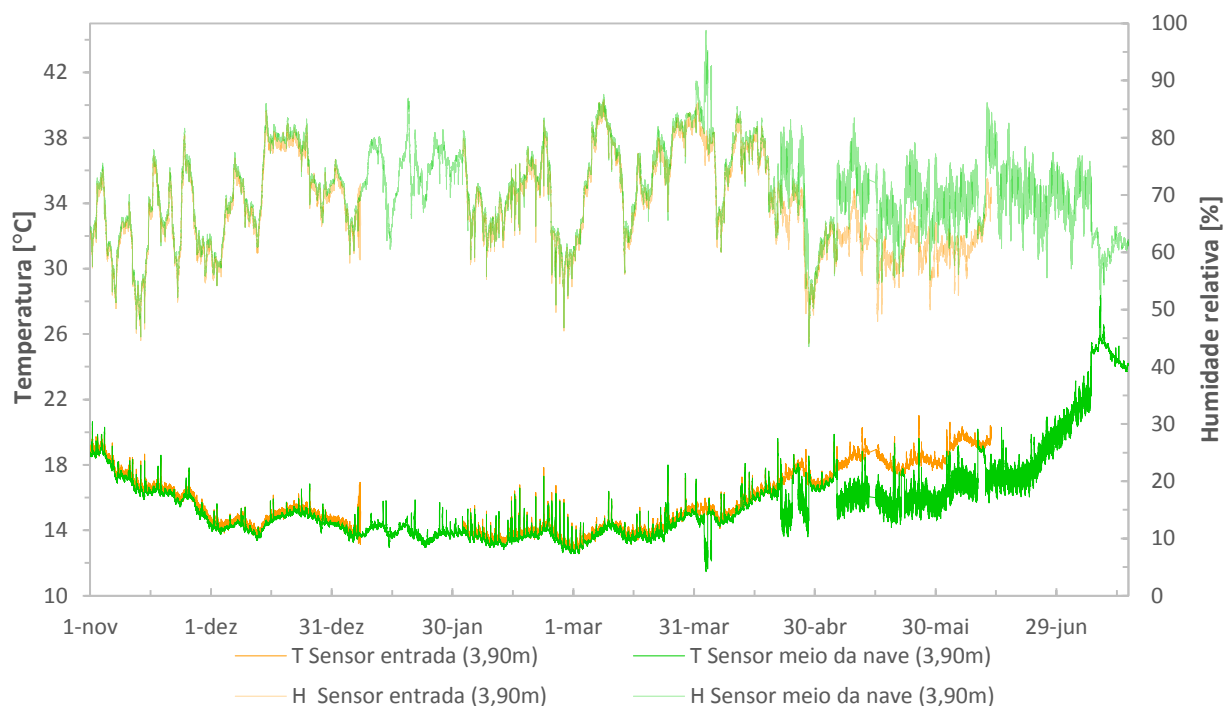


Figura 7.11 – Evolução da temperatura e humidade relativa no interior ao longo de um corte longitudinal no centro na nave principal a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

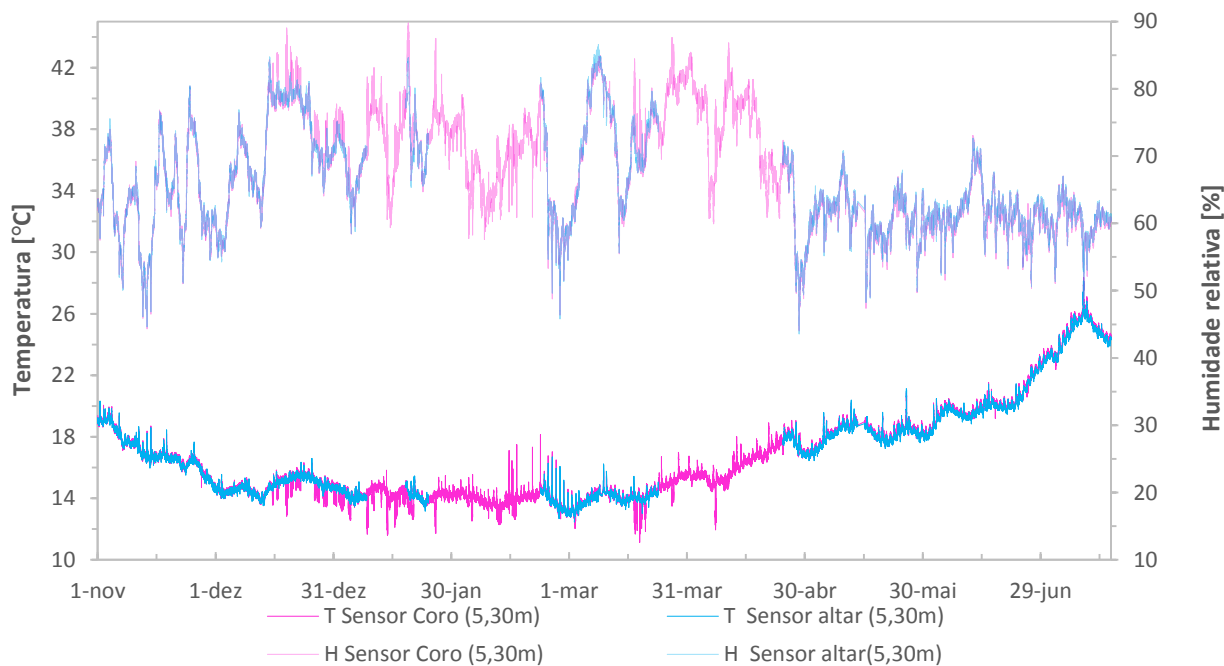


Figura 7.12 – Evolução das temperaturas e humidade relativa no interior ao longo de um corte longitudinal no centro na nave principal a 5,30 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

As humidades relativas apresentam tendências iguais sendo as humidades relativas do sensor T19 superior a do sensor T17 exceto entre 15 de Dezembro e 6 de Abril, ou seja, as variações são inversas as variações existentes na temperatura.

Na figura 7.13 encontra-se representado o andamento das temperatura e humidade relativa para dois sensores colocados a 3,90 m na fachada norte, sendo que um mede temperaturas do ar, T5, e o outro sensor mede temperaturas superficiais, T1.

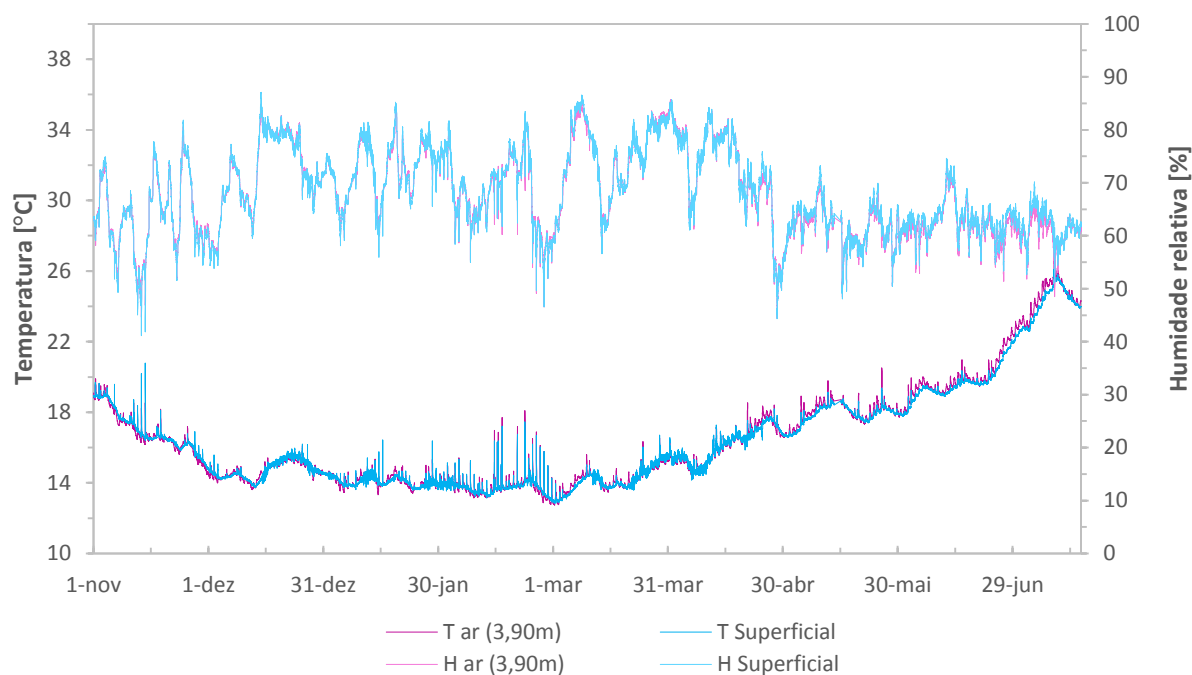


Figura 7.13 – Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

Em termos de temperatura verifica-se apresentação andamentos idênticos ao longo do período em análise. Verifica-se que até 24 de Abril a temperatura superficial é superior à temperatura do ar devido à elevada inércia térmica da parede provocar amortecimento e atraso nos ciclos sazonais. A partir dessa data passa a ser a temperatura superficial inferior à temperatura do ar.

A humidade relativa nunca ultrapassou os 85,0% ao longo de todo o período. Mesmo quando as temperaturas superficiais são inferiores as temperaturas do ar, que torna possível a existência de condensações superficiais, não se verificam condições necessárias para a saturação devido ao facto de a temperatura interior nunca atingir valores baixos que provocassem um aumento brusca da humidade relativa interior que pudesse levar à ocorrência de condensações.

7.1.2 Análise por estação do ano

Neste estudo foram recolhidos dados nas quatro estações do ano, ou seja, Outono, Inverno, Primavera e Verão. De seguida será realizada uma análise de uma semana em cada estação do ano, com início a um Domingo e término a um Sábado. Como apenas se analisa 7 dias consegue-se visualizar os fenómenos existentes num ciclo diário e realizar uma análise mais detalhada e rigorosa.

Para esta análise é importante referir que a igreja se encontra aberta à quarta e sábado das 17:00 h às 19:30 h, sendo celebrada a missa às 18:30 h e aos domingos das 11:00 h às 13:00 h, sendo a missa celebrada às 12:00 h.

7.1.2.1 Outono

Para a estação do Outono foi escolhida a semana entre 4 e 10 de Novembro onde a temperatura exterior já se encontra a baixar permitindo observar a influência que esta estação tem sobre o edifício.

Encontra-se representado na figura 7.14 a evolução da temperatura no exterior, no desvão da cobertura e no interior da nave principal a uma altura de 3,90m Novembro e na tabela 7.1 encontra-se a temperatura máxima e mínima para cada dia, assim como a hora onde se verificam os respectivos picos.

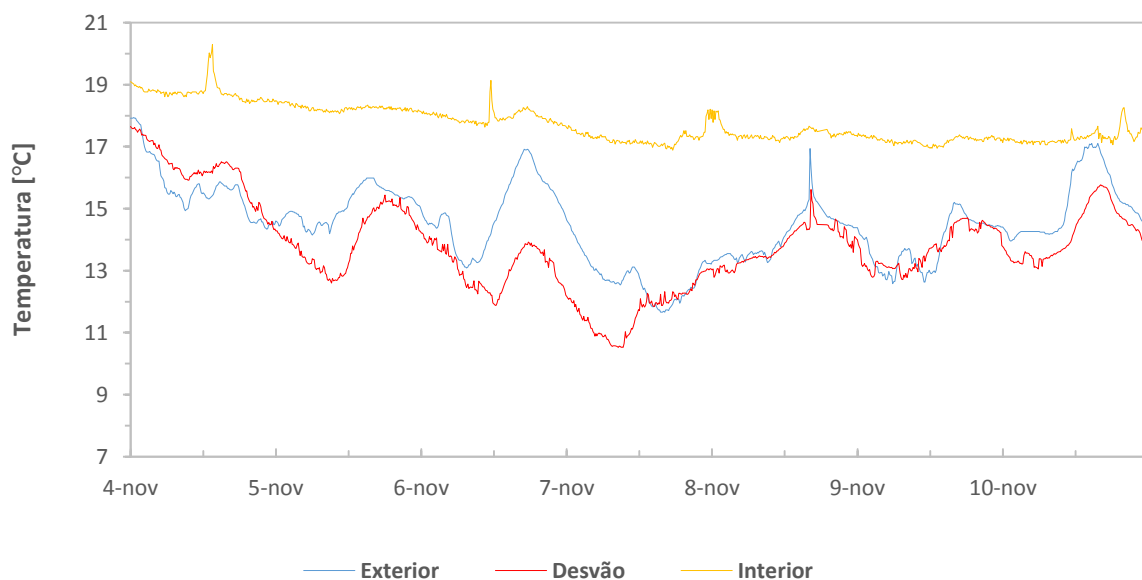


Figura 7.14 – Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012

Comparando as temperaturas no exterior e no desvão da cobertura é possível verificar que as temperaturas no desvão acompanham as variações existentes no exterior. Os ciclos diários do desvão acompanham os ciclos diários do exterior, mas esses ciclos são menos sinuosos do que os ciclos diários exteriores e apresentam um atraso temporal. Estas pequenas

Capítulo 7. Análise e discussão de resultados

diferenças acontecem devido à cobertura exercer resistência térmica. Deste modo, a resistência térmica da cobertura é responsável por diminuir os picos máximos e mínimos relativamente ao exterior enquanto a inércia térmica é responsável por os ciclos diários apresentarem um atraso temporal relativamente aos ciclos diários do exterior.

As temperaturas interiores também acompanham a tendência das temperaturas exteriores embora não exista variações tão sinuosas quanto no exterior. Embora as temperaturas no interior acompanhem a tendência decrescente do exterior verifica-se que a temperatura exterior não apresenta influência nos ciclos diários interiores, pois as condições interiores são bastante estáveis, justificado pela elevada inércia térmica do edifício. Através da tabela 7.1 é possível verificar que a temperatura máxima e mínima são próximas uma da outra o que mostra o quanto as condições interiores são estáveis.

Tabela 7.1 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro 2012

Dia		Exterior		Desvão		Interior	
		Hora [h]	Temperatura [°C]	Hora [h]	Temperatura [°C]	Hora [h]	Temperatura [°C]
Domingo 4	Máximo	00:30	17,9	00:00	17,7	13:30	20,3
	Mínimo	22:30	14,3	23:40	14,3	19:40	18,4
Segunda 5	Máximo	15:00	16,0	18:00	15,4	00:00	18,5
	Mínimo	06:00	14,1	09:10	12,6	10:30	18,1
Terça 6	Máximo	17:00	16,9	00:00	14,2	11:30	19,1
	Mínimo	07:30	13,1	12:20	11,9	10:30	17,6
Quarta 7	Máximo	00:00	14,6	23:40	13,1	23:40	18,2
	Mínimo	15:30	11,7	08:30	10,5	17:30	16,9
Quinta 8	Máximo	16:10	16,9	16:20	15,6	00:20	18,2
	Mínimo	04:10	13,3	00:20	12,8	11:10	17,1
Sexta 9	Máximo	16:00	15,2	18:10	14,7	16:50	17,4
	Mínimo	05:30	12,6	07:20	12,7	12:00	17,0
Sábado 10	Máximo	14:40	17,1	16:10	15,8	20:00	18,3
	Mínimo	01:30	14,0	05:50	13,1	05:00	17,1

Ao longo destes 7 dias de análise verifica-se que as temperaturas no interior ainda se encontram sobre influência das temperaturas elevadas do Verão sendo o valor mínimo registado de 16,9°C, devido à elevada inercia térmica do edifício causar um atraso no ciclo sazonal.

As variações de humidade relativa para o desvão da cobertura, exterior e interior da nave principal encontram-se representados na figura 7.15. A humidade relativa no desvão da cobertura e no interior da igreja acompanha as tendências da humidade relativa do exterior.

No desvão da cobertura é onde se registam os valores mais elevados devido ao facto de o desvão ser um local fechado e pouco ventilado, ou seja, um local onde os níveis de vapor de

água se mantêm elevados. Mesmo sendo o local onde a humidade relativa é maior verifica-se que nunca atinge a saturação pois nunca se ultrapassa os 95,0%.

A humidade relativa no interior varia inversamente com a temperatura, ou seja, apresenta os seus picos inferiores quando a temperatura apresenta um pico superior e vice-versa. Até dia 7 de Novembro a humidade relativa diminui acompanhando a tendência exterior embora de forma menos acentuada, atingindo o seu mínimo com um valor de 51,0%. A partir de 7 de Novembro aumenta e apresenta poucas variações até ao final da semana em análise.

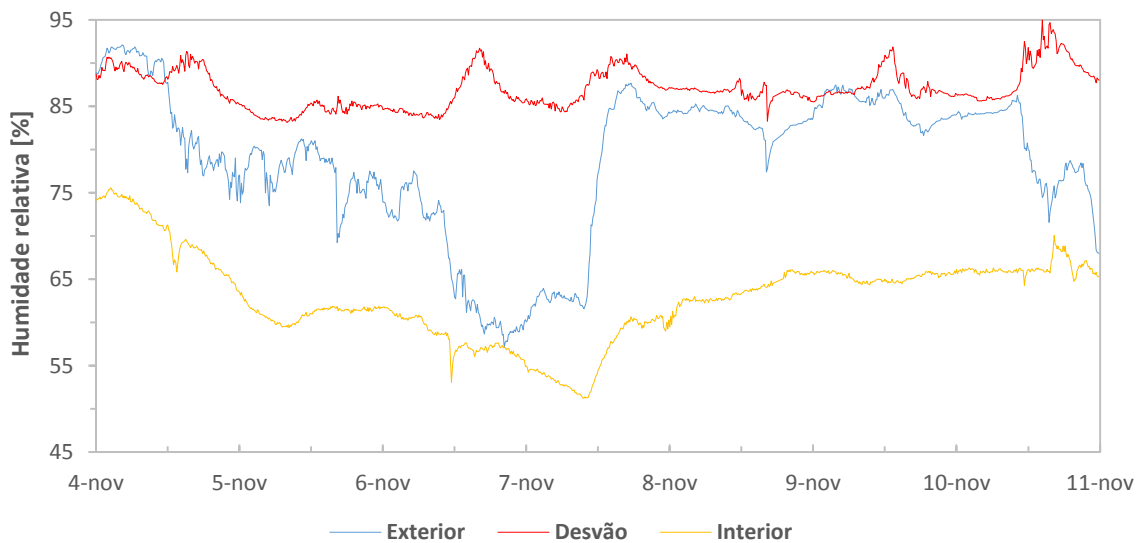


Figura 7.15 – Evolução da humidade relativa no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012

Na figura 7.16 apresentam-se os valores de temperatura e humidade relativa para as diferentes divisórias da igreja, nomeadamente para a sacristia, casa mortuária, altar e nave principal.

Em termos de temperatura verifica-se que é a sacristia que apresenta a temperatura média superior á da casa mortuária embora a sacristia se encontre orientada a norte, recebendo menos radiação solar do que a casa mortuária que se encontra orientada a sul. Este facto pode ser justificado pela sacristia ainda se encontrar sobre influência das temperaturas de Primavera/Verão enquanto na casa mortuária a temperatura média baixou mais rapidamente através da entrada de ar mais frio proveniente do exterior através de uma porta de acesso ao interior da igreja localizada na casa mortuária. Os valores do altar-mor encontram-se bastante próximos dos valores da nave principal e é nestes dois locais que se registam os valores mais elevados, por se encontram sobre influência da estação de Verão, pois o sensor localizado no centro da nave principal apresenta grande interioridade e o sensor do altar encontra-se numa zona em que a igreja está enterrada pelo que ambos estão localizados em zonas que acompanham as variações exteriores de forma mais lenta e gradual.

Em termos de humidade relativa verifica-se que os valores mais baixos são registados no interior da nave principal enquanto os mais elevados na sacristia, nunca ultrapassando os 79%.

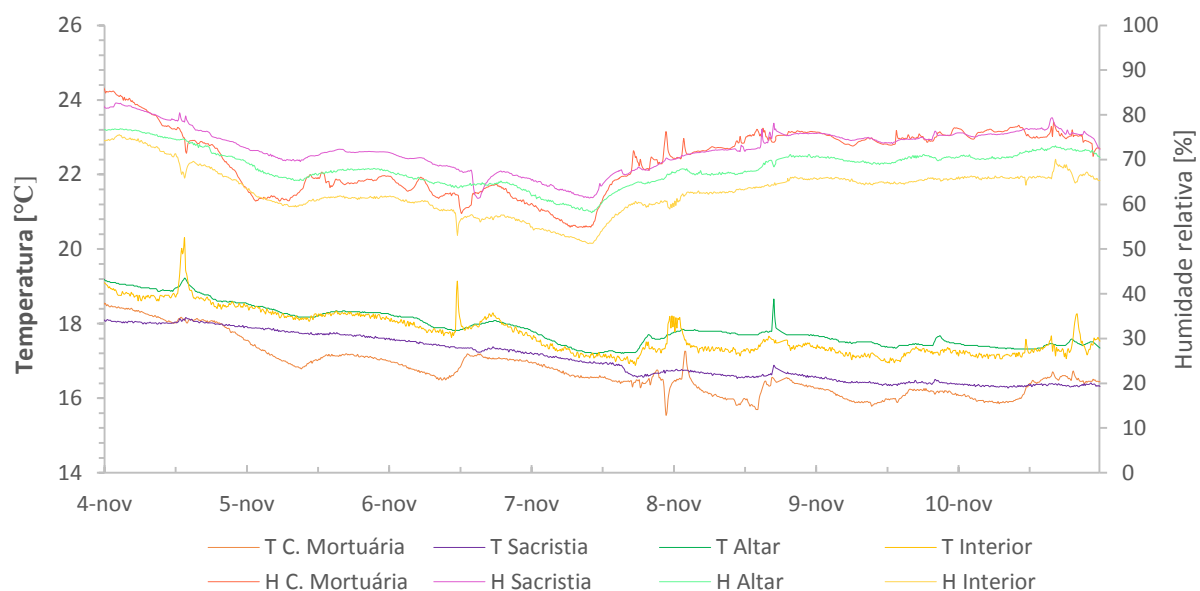


Figura 7.16 – Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012

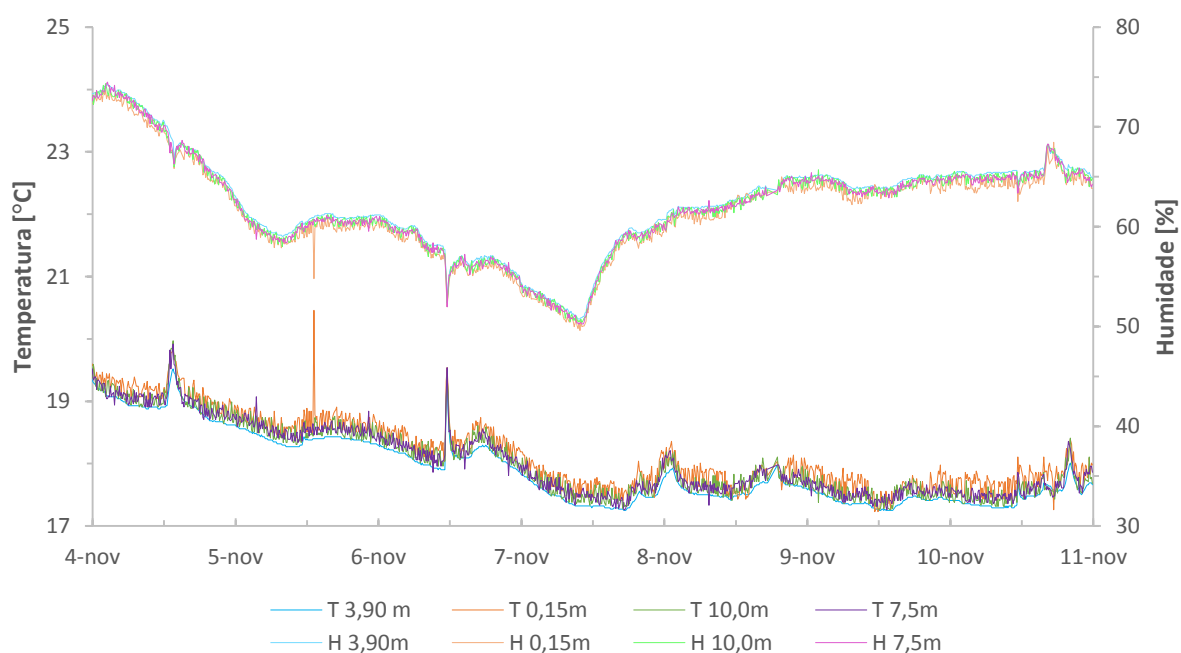


Figura 7.17 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012

Na figura 7.17 encontra-se representado as evoluções da temperatura e da humidade relativa junto ao púlpito norte ao longo de uma coluna vertical composto pelos termopares T11, T5, T8 e T12 que se encontram colocados a alturas referentes ao pavimento de 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m.

Em termos de temperatura observa-se que os valores mais elevados se encontram no sensor junto ao pavimento, ou seja, no sensor a 0,15 m, justificado pelo facto de o pavimento ainda se encontrar influenciado pelo período do Verão onde acumulou calor que é libertado de forma gradual e lenta por este apresentar elevada inercia térmica por se encontrar em contacto com o solo. Para as restantes alturas verifica-se que a temperatura é crescente desde 3,90 m até aos 10 m.

Assim, conclui-se que o ar não se encontra estratificado por temperaturas devido ao facto de as temperaturas mais elevadas serem as junto ao pavimento. Deste modo o ar quente e menos denso junto ao pavimento sobe e ao encontrar temperaturas mais baixas junto da cobertura arrefece o que sua aumenta a densidade e desce, ou seja, existem correntes convectivas.

Relativamente á humidade verifica-se o oposto da temperatura, ou seja os valores mais baixos junto do pavimento e os mais baixos a 3,90 m. Durante este período a humidade nunca ultrapassa os 80%, ou seja, não se aproxima dos valores de saturação.

Na figura 7.18 apresenta-se a evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de um corte transversal na nave principal da igreja a 3,90m de altura. O corte é composto pelo sensor T5 colocado junto do púlpito norte, o T6 colocado a meio da nave e o T7 colocado no púlpito sul.

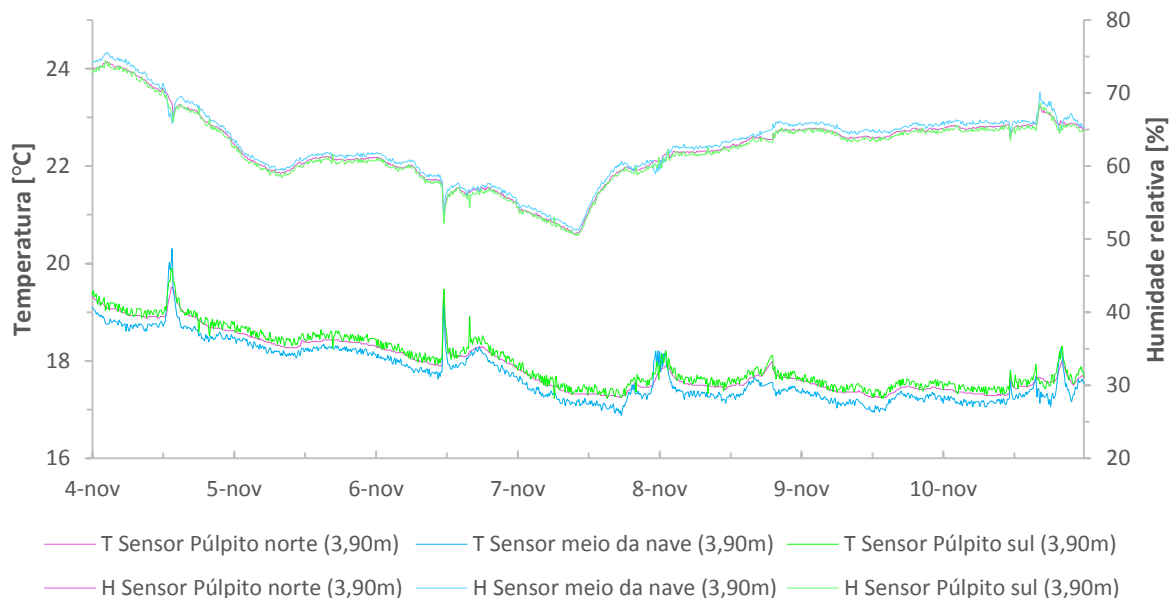


Figura 7.18 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 4 de Novembro e 10 de Novembro de 2012

Em termos de temperatura os sensores apresentam um andamento semelhante ao longo do período em análise. Durante o período o sensor onde se a temperatura é mais baixa é o sensor colocado no centro da nave principal, devido à sua maior interioridade e ao facto de os sensores junto das paredes se encontrarem sobre influência da energia acumulada durante o Verão. Os valores mais elevados são registados no sensor colocado do púlpito sul, devido ao facto de o lado sul ficar mais exposto a mais radiação solar directa.

No que respeita à humidade é possível verificar um andamento inverso ao da temperatura, ou seja os valores de humidade relativa mais elevados localizam-se no centro da nave principal e mais baixos no sensor colocado no púlpito sul.

Na figura 7.19 encontra-se representado a evolução da temperatura e humidade relativa para dois sensores colocados a 3,90 m na fachada norte, sendo que um mede temperaturas do ar, T5, e o outro sensor mede temperaturas superficiais, T1.

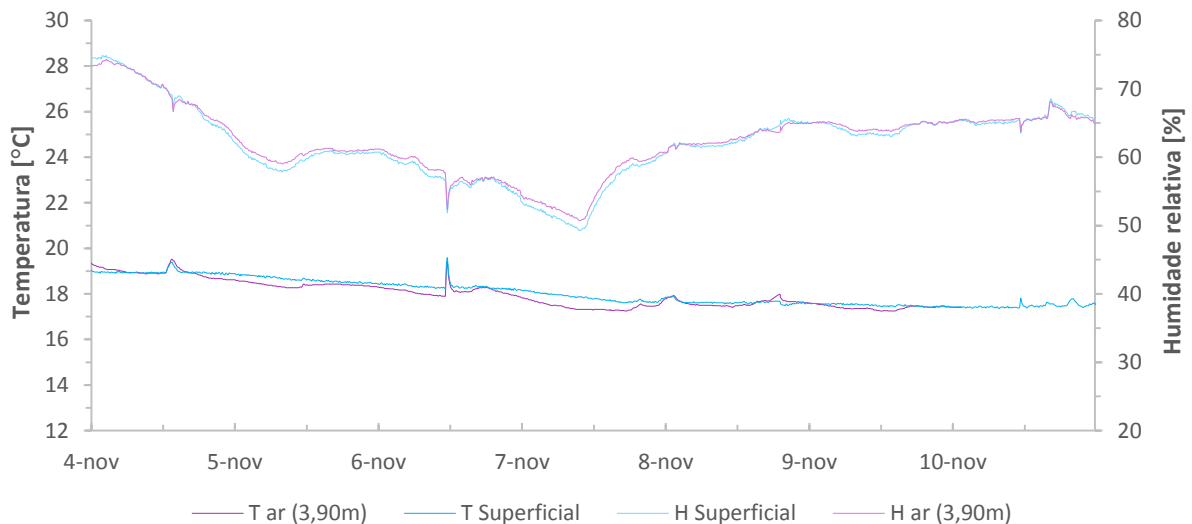


Figura 7.19 – Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 4 de Novembro e 11 de Novembro 2012

Relativamente à temperatura verifica-se que ao longo este período o sensor superficial apresenta valores superiores ao sensor do ar existindo apenas contrário em alguns pontos sendo, nesse caso, o afastamento entre valores registados nos dois sensores mínimo. O facto de a temperatura superficial ser superior à temperatura do ar deve-se às espessas paredes ainda conterem energia acumulada durante o período de Primavera/Verão.

Tal como era de esperar em termos de humidade relativa verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, sendo os seus valores localizados entre os 50% e os 75%, ou seja, longe das condições de saturação.

7.1.2.2 Inverno

Para a semana do inverno foi escolhido o período entre 3 e 9 de Fevereiro, sendo esta semana uma das mais frias da estação e de maior humidade relativa.

Encontra-se representado na figura 7.20 a evolução das temperaturas no exterior, no desvão da cobertura e no interior da nave principal a uma altura de 3,90m Novembro e na tabela 7.2 encontra-se a temperatura máxima e mínima para cada dia assim como a hora onde se verificam os respectivos picos.

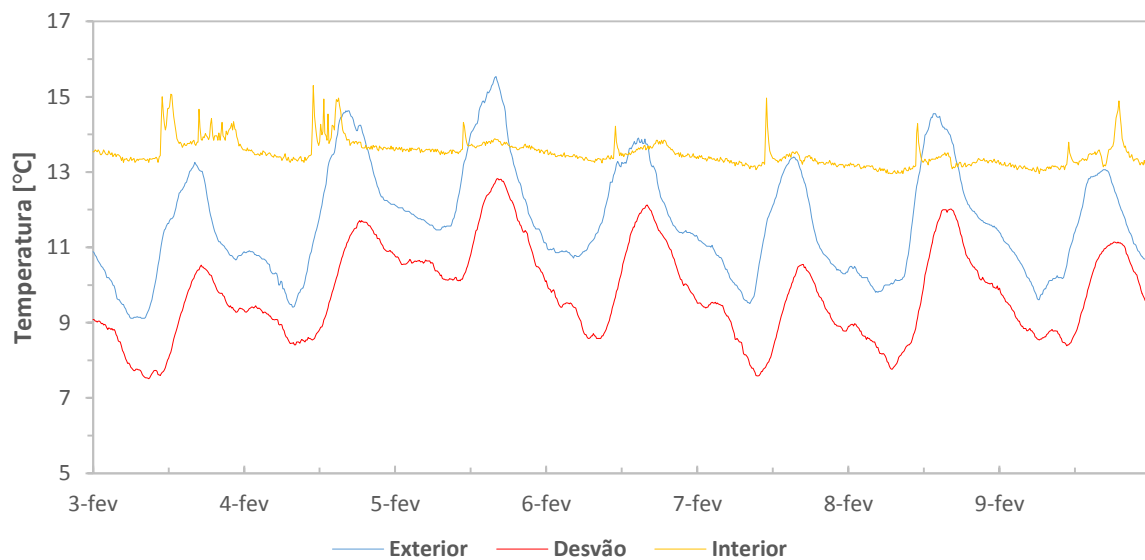


Figura 7.20 – Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013

Em termos de temperatura, é possível observar que no desvão da cobertura esta acompanha as variações existentes no exterior, ou seja, acompanha os ciclos diários do exterior embora esses ciclos aconteçam com um pequeno atraso e de forma menos sinuosa devido à inércia térmica que a cobertura exerce. Ao longo deste intervalo de tempo é possível verificar que as temperaturas mais baixas são registadas no desvão da cobertura, justificado pelo facto a resistência térmica da cobertura já ter sido vencida pelas temperaturas baixas da estação, de o desvão ser um local fechado e com pouca ventilação e de a radiação solar directa que a cobertura consegue absorver ser a suficiente para a temperatura no interior do desvão aumentar.

Analisando a tabela 7.2 confirma-se que entre os ciclos diários do exterior e do desvão existe sempre um atraso, pois os picos diários no desvão ocorrem sempre após os picos diários no exterior, assim como, a diferença entre os valores máximos e mínimos diários no exterior é superior à diferença entre os picos diários no desvão da cobertura. Tal acontece por a inércia térmica da cobertura já ter sido vencida para os ciclos sazonais e por apresentar uma fraca ventilação.

Capítulo 7. Análise e discussão de resultados

Analisando a figura 7.20 em termos de temperatura interior verifica-se que é bastante estável ao longo período, sendo os seus ciclos diários muito menos sinuosos do que no exterior. A casa desta estabilidade deve-se às paredes exteriores serem bastante espessas o que lhes confere uma forte inércia térmica.

Pela tabela 7.2 verifica-se que os valores máximos nos dias em que existe celebrações religiosas acontecem durante essas celebrações, excepto na quarta-feira, dia 6 de Fevereiro, que acontece antes da abertura da igreja. Mas embora o pico positivo seja antes da abertura da igreja é possível verificar pela figura 7.18 que durante a celebração da missa existe um aumento de temperatura no interior da nave principal.

Assim, conclui-se que a elevada inercia térmica do edifício origina com que as variações existentes no exterior praticamente não influenciem a temperatura interior, principalmente para os ciclos diários interiores.

Tabela 7.2 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 3 de Fevereiro a 9 de Fevereiro 2013

Dia		Exterior		Desvão		Interior	
		Hora [h]	Temperatura [°C]	Hora [h]	Temperatura [°C]	Hora [h]	Temperatura [°C]
Domingo 3	Máximo	16:10	13,3	17:10	10,5	12:20	15,1
	Mínimo	06:00	9,1	08:50	7,5	04:50	13,3
Segunda 4	Máximo	16:10	14,6	18:20	11,7	11:00	15,3
	Mínimo	07:40	9,4	08:00	8,4	09:30	13,3
Terça 5	Máximo	16:00	15,5	16:10	12,8	10:50	14,3
	Mínimo	23:40	11,1	23:50	10,1	07:20	13,5
Quarta 6	Máximo	14:40	13,9	16:00	12,1	11:00	14,2
	Mínimo	04:20	10,7	06:40	8,6	08:50	13,2
Quinta 7	Máximo	15:20	13,4	16:40	10,5	11:00	15,0
	Mínimo	08:20	9,5	09:30	7,6	09:20	13,1
Sexta 8	Máximo	13:30	14,6	16:10	12,0	11:00	14,3
	Mínimo	04:20	9,8	06:50	7,8	06:20	13,0
Sábado 9	Máximo	16:30	13,1	18:10	11,1	19:00	14,9
	Mínimo	06:10	9,6	10:40	8,4	06:20	13,0

Através da figura 7.21 é possível observar o andamento de humidade relativa para o exterior, desvão da temperatura e para o interior da nave principal.

O andamento da humidade relativa no desvão apresenta variações ao longo de um ciclo diário embora sejam muito menores que as variações no exterior. Por o desvão ser um local fechado e pouco ventilado, mantendo elevado níveis de vapor de água no seu interior pelo que a humidade relativa neste período é sempre superior a 87,9%, com um máximo bastante próximo das condições de saturação de 98,8% no dia 5 de Fevereiro.

No interior a humidade relativa apresenta uma evolução inversa à temperatura, sendo o valor máximo de humidade relativa coincidente com o mínimo de temperatura e o mínimo de humidade relativa coincidente com o máximo de temperatura. A humidade relativa no interior nunca se aproxima das condições de saturação, estando compreendida entre os 55,9% e os 71,8%.

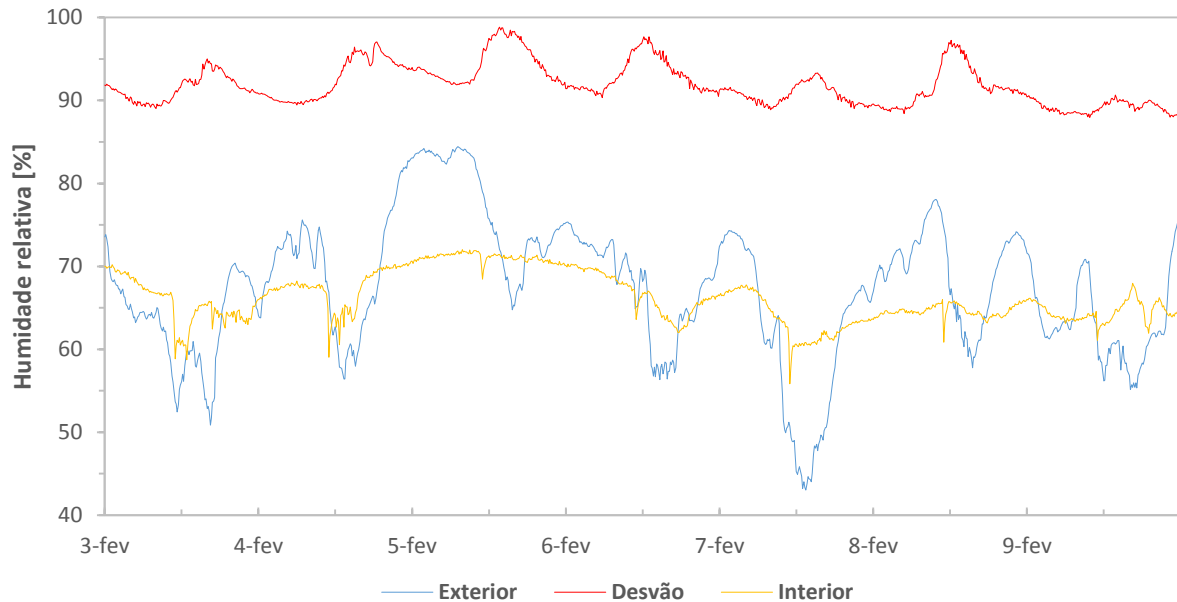


Figura 7.21 – Evolução da humidade relativa, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013

Na figura 7.22 encontra-se a evolução da temperatura e humidade relativa na casa mortuária, na sacristia, altar-mor e na nave principal.

A sacristia é a zona mais fria do edifício, devido ao facto de se encontrar orientada a norte, recebendo menos radiação solar em conjunto com o facto de a zona norte da igreja se encontrar bastante encoberta pelos edifícios circundantes. Já na casa mortuária é onde se verificam as temperaturas mais elevadas ao longo do período em análise, sendo justificado pelo facto de se encontrar orientada a sul recebendo radiação solar directa. As temperaturas intermédias são registadas no altar e na nave principal.

Em termos de humidade relativa verifica-se que no altar-mor se registam os valores mais elevados excepto nos dias 5 e 6 de Fevereiro. Já os valores mais baixos são registados no interior da nave principal.

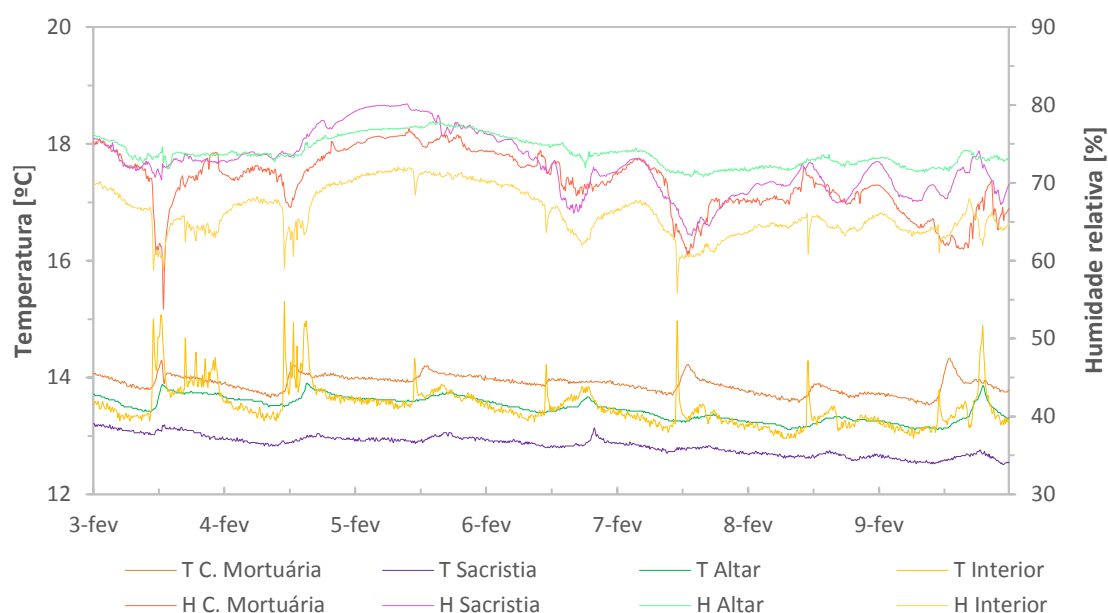


Figura 7.22 – Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013

Através da figura 7.23 é possível analisar o andamento da temperatura e da humidade relativa para uma coluna vertical junto do púlpito norte composto pelos termopares T11, T5, T8 e T12 que se encontram colocados a alturas referentes ao pavimento de 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m.

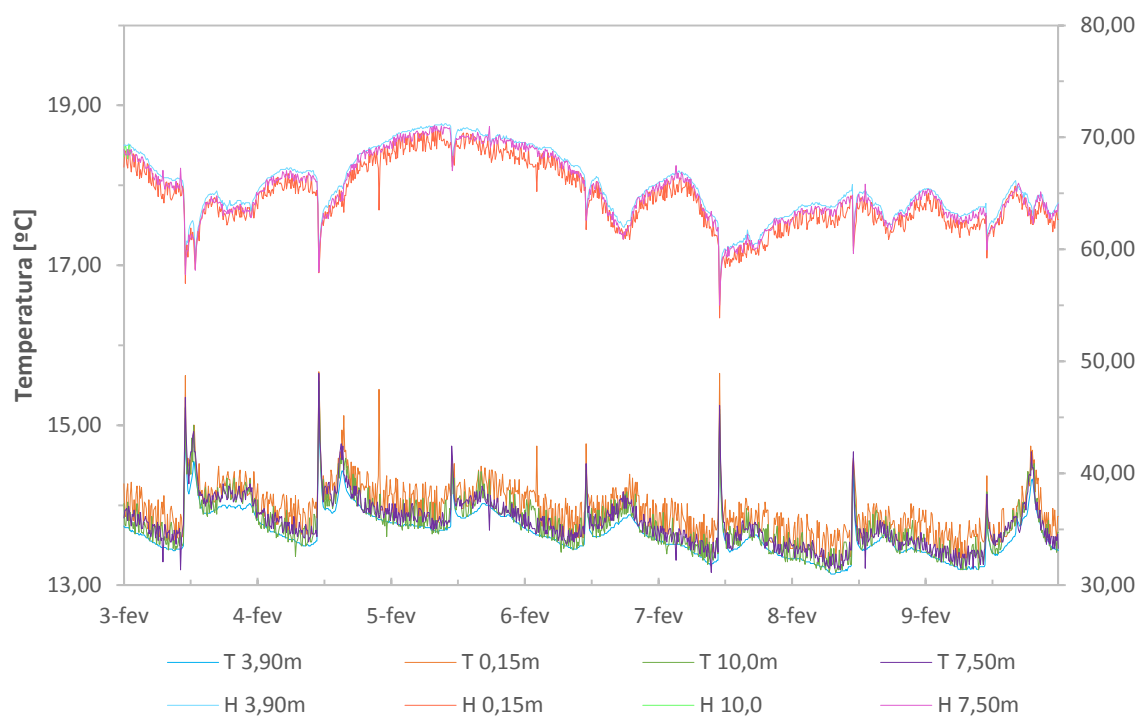


Figura 7.23 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro 2013

Em termos de temperatura verifica-se que os valores mais elevados se localizam junto do pavimento devido a este apresentar uma elevada inércia térmica, por se encontrar em contacto com o solo, sofrendo ainda a influência das elevadas temperaturas do período Primavera/Verão. Relativamente ao ar junto do topo (10,0m) do edifício verifica-se que este encontra-se mais frio do que no Outono, sendo a sua temperatura inferior do que nos 7,50m e mais elevada do que nos 3,90m.

Deste modo verifica-se a ocorrência de correntes convectivas, devido ao ar nas proximidades do pavimento se encontrar mais quente e menos denso do que a cobertura.

Para a humidade relativa verifica-se o inverso da temperatura, sendo os valores mais elevados obtidos a 3,90m e os mais baixos junto do pavimento. A humidade relativa varia entre os 53,9% e os 70,8%.

Na figura 7.24 apresenta-se a evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de um corte transversal na nave principal da igreja a 3,90m de altura. O corte é composto pelo sensor T5 colocado junto do púlpito norte, o T6 colocado a meio da nave e o T7 colocado no púlpito sul.

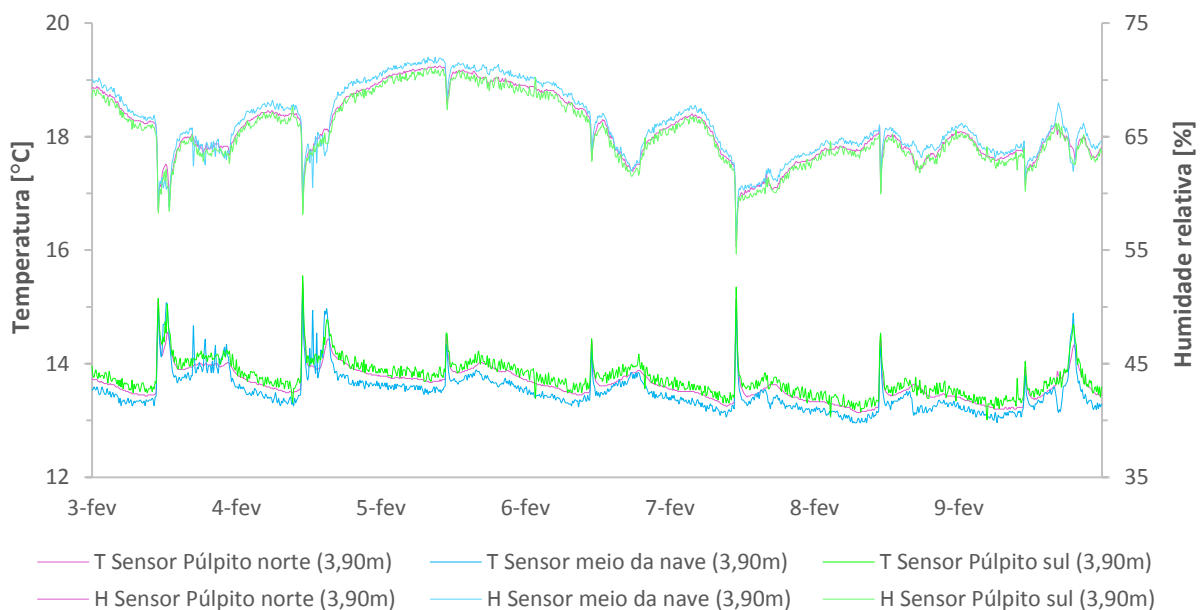


Figura 7.24 – Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013

Relativamente à temperatura verifica-se que apresenta uma tendência semelhante nos três sensores, com as temperaturas mais baixas verificadas no sensor localizado no centro da nave principal, devido à sua interioridade e as mais elevadas no sensor junto do púlpito sul, ou seja, do lado onde a igreja se encontra mais exposta à radiação solar.

Em termos de humidade relativa existe uma disposição inversa, onde os valores mais baixos são registados junto do púlpito sul e os mais elevados são registados a meio da nave principal, nunca ultrapassando os 70,9%.

Encontra-se representado na figura 7.25 a evolução da temperatura e humidade relativa para dois sensores colocados a 3,90 m na fachada norte, sendo que um mede temperaturas do ar, T5, e o outro sensor mede temperaturas superficiais, T1.

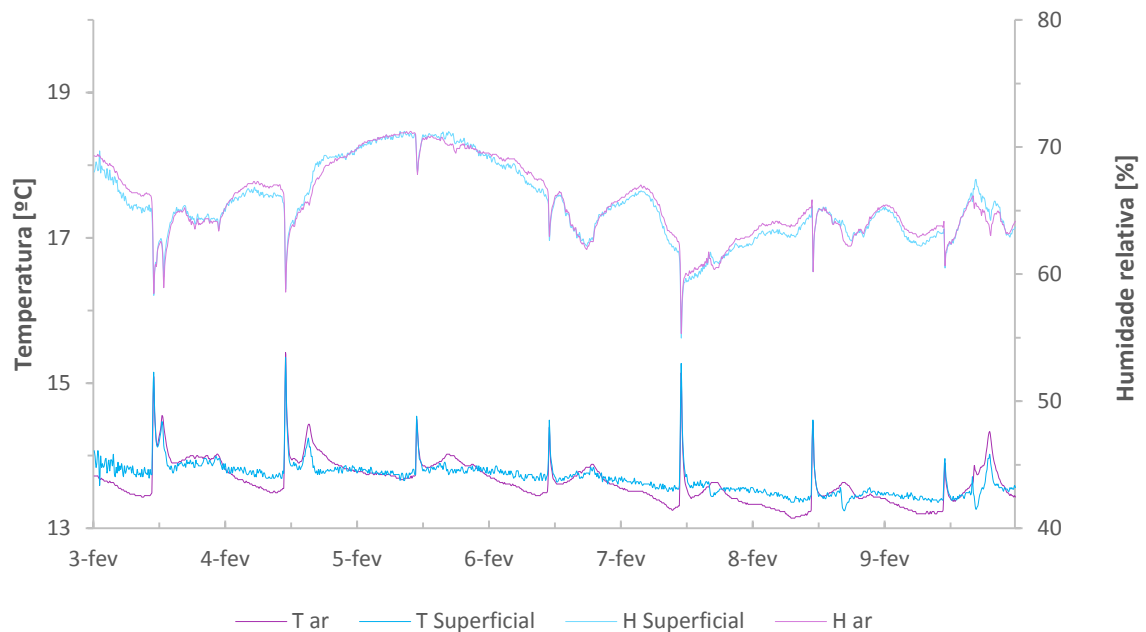


Figura 7.25 - Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 3 de Fevereiro e 9 de Fevereiro de 2013

Em termos de temperatura verifica-se, à semelhança do Outono, que o sensor superficial apresenta valores superiores ao sensor do ar, verificando-se pontualmente o inverso e onde o afastamento entre valores registados nos dois sensores mínimo. Como as paredes ainda contêm calor acumulado durante o período de Primavera/Verão a temperatura superficial é superior temperatura do ar, mas já se começa a verificar a tendência para a inversão desta disposição.

Quanto à humidade relativa verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, sendo os seus valores localizados entre os 55% e os 72%, ou seja, longe das condições de saturação.

7.1.2.3 Primavera

Para a estação da primavera escolheu-se a semana de 26 de Maio a 2 de Junho para a estação de Primavera uma vez que neste período a temperatura exterior já se encontra a subir permitindo observar a influência que esta estação tem sobre o edifício.

Na figura 7.24 encontra-se representado a evolução da temperatura no exterior, no desvão da cobertura e no interior da nave principal a uma altura de 3,90m e na tabela 7.3 encontra-se a temperatura máxima e mínima para cada dia, assim como a hora onde se verificam os respectivos picos.

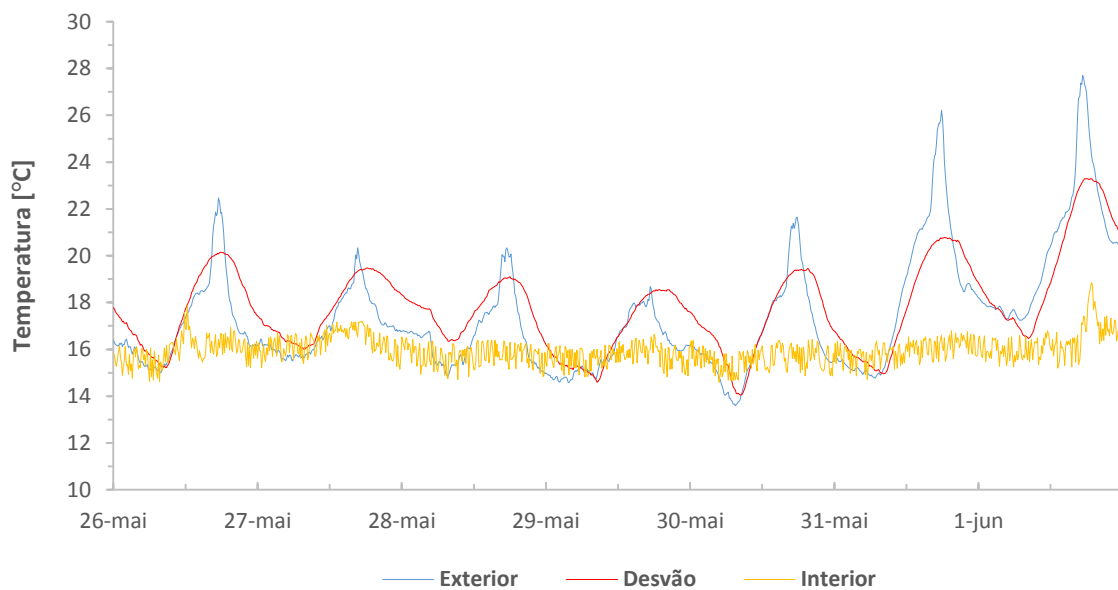


Figura 7.26 - Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho de 2013

Da análise da figura 7.26 verifica-se que a temperatura no desvão acompanha o andamento da temperatura do exterior, sendo os seus ciclos diários menos sinuosos e com um pequeno atraso relativamente ao exterior. Verifica-se que a temperatura média do desvão é superior à temperatura média do exterior devido ao facto de a radiação solar aumentar a temperatura do desvão através de condução de calor pela cobertura, ou seja, a inércia térmica da cobertura já se encontra a ser vencida para os ciclos sazonais. Simultaneamente e em análise conjunta com a tabela 7.3, verifica-se que a inércia térmica da cobertura é responsável por os ciclos diários do desvão, relativamente aos ciclos diários do exterior, serem menos sinuosos e com um atraso, sendo que os picos no desvão ocorrem sempre após os picos do exterior.

No notória a inércia térmica do edifício pois os ciclos diários apresentam-se bastante amortecidos e com atraso relativamente ao exterior.

Capítulo 7. Análise e discussão de resultados

Pela tabela 7.3 verifica-se nos dias em que existe celebração da missa, ou seja no dia 26, dia 29 e dia 1 as temperaturas máximas ocorrem às 12:20, às 18:00 e às 18:50, respectivamente. Ou seja, quando existe celebrações religiosas os picos positivos ocorrem durante essas celebrações, ou seja durante a presença de pessoas no interior do edifício.

Conclui-se que os ciclos diários são muito influenciados pela inercia térmica do edifício, tornando os ciclos diários amortecidos e atrasados relativamente aos ciclos existentes no exterior, e que nos dias de celebrações religiosas as temperaturas máximas ocorrem durante essas celebrações devido à presença humana aumentar a temperatura do interior.

Tabela 7.3 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho de 2013

Dia		Exterior		Desvão		Interior	
		Hora [h]	Temperatura [°C]	Hora [h]	Temperatura [°C]	Hora [h]	Temperatura [°C]
Domingo 26	Máximo	17:30	22,5	17:50	20,2	12:20	17,9
	Mínimo	07:50	15,0	08:40	15,2	06:00	14,6
Segunda 27	Máximo	16:40	20,3	18:10	19,5	17:20	17,2
	Mínimo	04:40	15,5	07:50	16,0	23:40	15,2
Terça 28	Máximo	17:30	20,3	18:00	19,1	00:00	16,5
	Mínimo	07:40	14,8	23:50	16,3	09:20	14,7
Quarta 29	Máximo	17:20	18,7	18:20	18,6	18:00	16,7
	Mínimo	03:50	14,6	08:30	14,6	06:30	14,8
Quinta 30	Máximo	17:50	21,7	19:30	19,4	20:20	16,4
	Mínimo	07:30	13,6	08:30	14,0	04:50	14,6
Sexta 31	Máximo	17:50	26,2	18:20	20,8	19:30	16,8
	Mínimo	06:50	14,8	08:10	15,0	05:30	14,7
Sábado 1	Máximo	17:20	27,7	17:50	23,3	18:50	18,8
	Mínimo	06:50	17,2	08:20	16,5	13:10	15,2

Representado na figura 7.27 encontra-se a evolução da humidade relativa no exterior, no desvão da cobertura e no interior da nave principal a uma altura de 3,90m.

O andamento da humidade relativa no desvão é semelhante ao andamento no exterior mas os ciclos diários são mais ténues. Durante este período a humidade relativa média do desvão é inferior à do exterior apresentando valores inferiores aos existentes durante o Outono e Inverno, variando entre os 48,3% e os 70,6%.

No interior são visíveis os ciclos diários mas estes menos sinuosos que os ciclos diários do exterior, mas mais sinuosos que os ciclos diários existentes no Outono e Inverno. A humidade relativa também é inferior à registada no Outono e no Inverno, com valores compreendidos entre os 55,2% e os 77,2%.

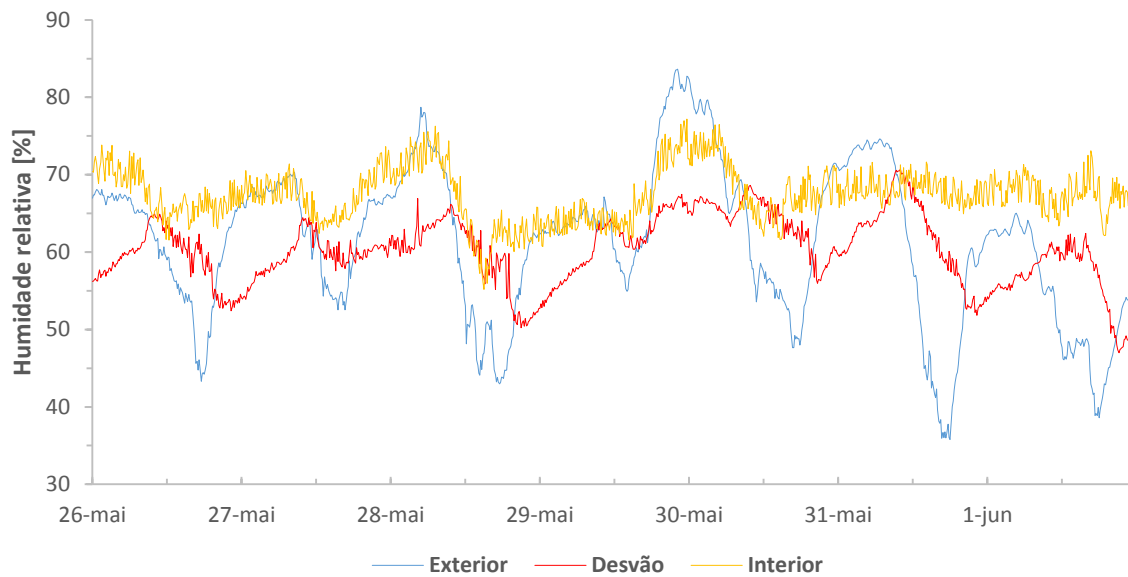


Figura 7.27 - Evolução da humidade relativa no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho de 2013

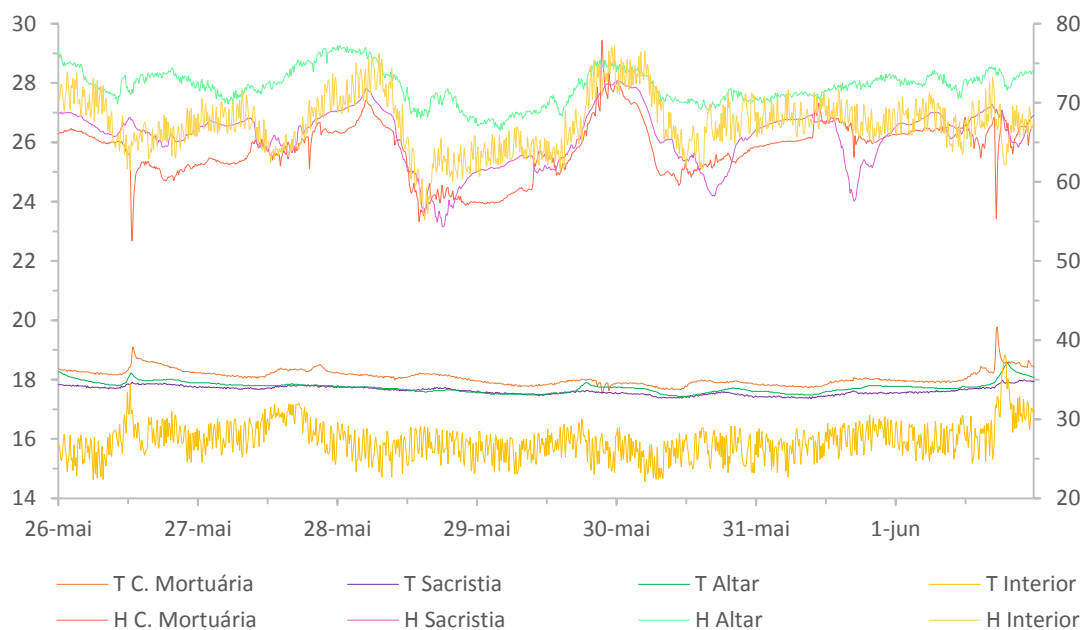


Figura 7.28 - Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho

Na figura 7.28 encontra-se a evolução da temperatura e humidade relativa na casa mortuária, na sacristia, altar-mor e na nave principal.

Relativamente à temperatura a casa mortuária é onde se encontram as temperaturas mais elevadas durante este período, derivado a esta parte do edifício se encontrar orientado a sul

recebendo maior radiação solar directa. Na nave principal é onde se regista a temperatura mais baixa justificado pela interioridade e pelo facto de os restantes sensores se encontrarem mais próximos das paredes exteriores permitindo ser influenciados pelas temperaturas exteriores. A sacristia apresenta temperatura média superior ao altar pelo se encontrar orientada a norte, ou seja, encontrando-se orientada de modo a receber pouca radiação solar.

Em termos de humidade relativa verifica-se que no altar-mor é onde é mais elevada, encontrando-se compreendida entre os 65,9% e os 76,6%. Os valores baixos registam-se na casa mortuária e os intermédios na nave principal e na sacristia. E qualquer um dos espaços não se verifica as condições de saturação.

Encontra-se representado na figura 7.29 a evolução da temperatura e da humidade relativa junto ao púlpito norte ao longo de uma coluna vertical composto pelos termopares T11, T5, T8 e T12 que se encontram colocados a alturas referentes ao pavimento de 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m.

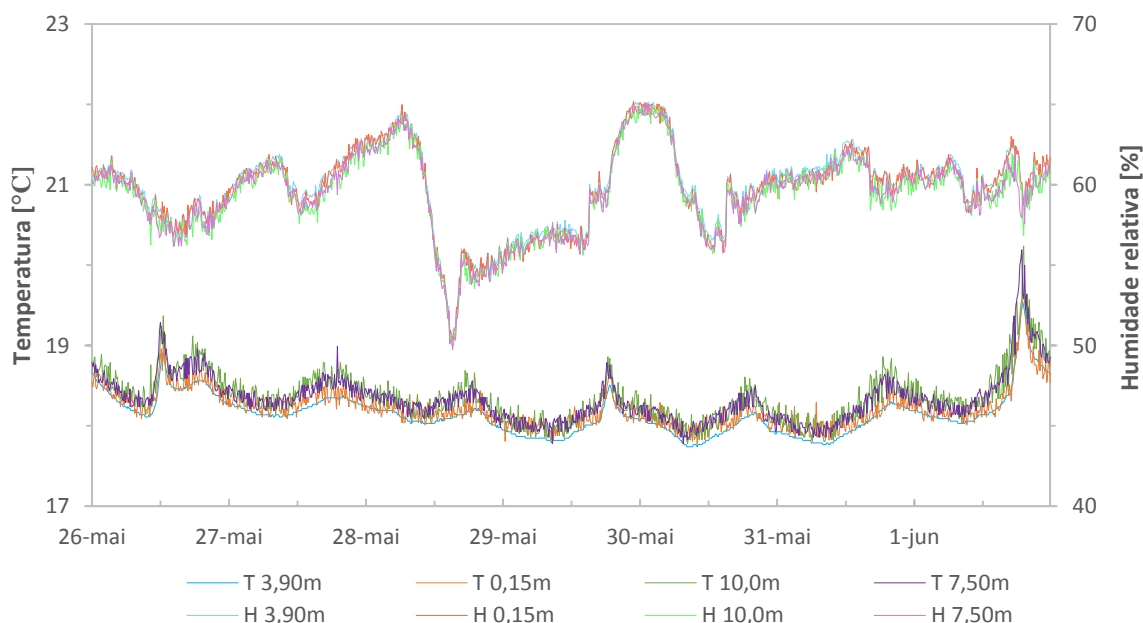


Figura 7.29 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho

Em termos de temperatura que já ocorreu uma alteração na disposição das temperaturas, pois junto da cobertura é onde existe os valores mais elevados, seguindo-se as temperaturas a 7,50 m, a 0,15m, e por fim as mais baixas a 3,90m. Nesta altura já se verifica a tendência para estratificação de temperaturas, mas ainda existe correntes convectivas devido à temperatura média a 3,90m ser inferior à existente a 0,15m.

Em termos de humidade relativa, verifica-se que junto da cobertura é onde a humidade relativa é menor, seguindo-se a humidade relativa a 7,50m, a 0,15 m, e a mais elevada a 3,90 m. O andamento da humidade relativa nos quatro sensores é semelhante e os valores encontram-se compreendidos entre 49% e 66%.

Na figura 7.30 encontra-se representado a evolução da temperatura e da humidade relativa ao longo de um corte transversal junto dos púlpitos.

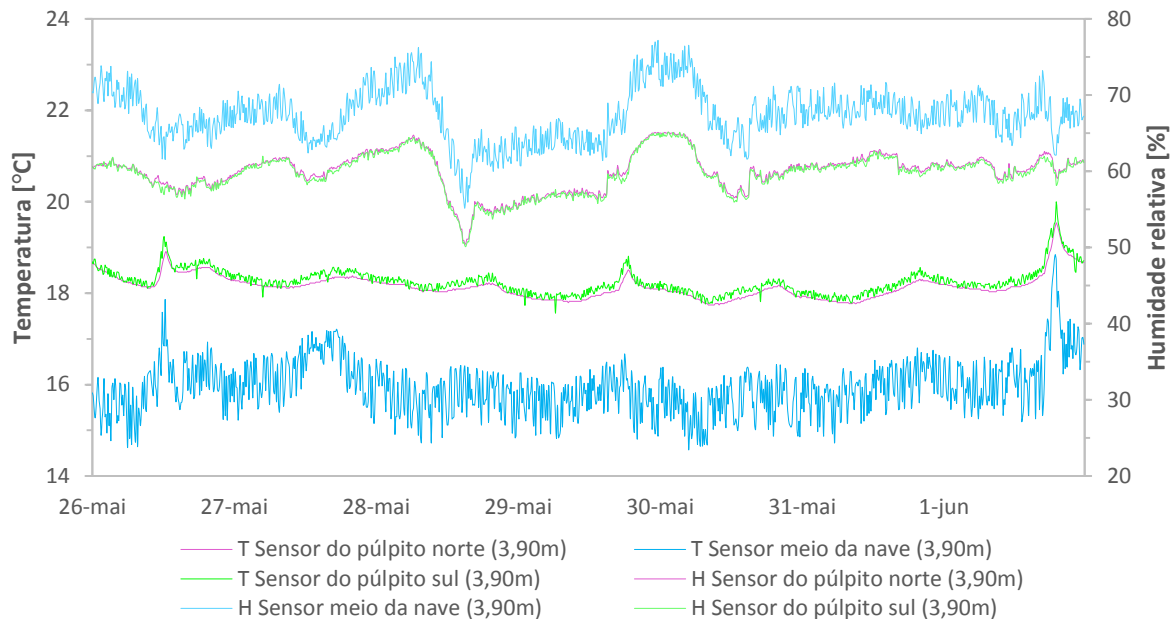


Figura 7.30 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 26 de Maio e 1 de Junho

No que respeita à temperatura, verifica-se que é no centro da nave principal que se registam temperaturas bastante mais baixas do que as registadas nos púlpitos justificado pela sua interioridade e pelo facto de os sensores colocados nos púlpitos se encontrarem próximos das paredes exteriores sofrendo uma maior influencia das condições climáticas exteriores. O sensor localizado no púlpito sul regista temperaturas superiores as temperaturas no púlpito norte, devido à zona sul da igreja se encontrar mais exposta a radiação solar directa.

Em termos de humidade relativa verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, sendo os valores mais elevados obtidos no centro da nave principal, os mais baixos no sensor colocado na parte sul da igreja e os intermédios na parte norte da igreja. Nunca foram verificadas condições de saturação e a humidade relativa máxima foi de 78%.

Encontra-se representado na figura 7.31 a evolução da temperatura e humidade relativa para dois sensores colocados a 3,90 m na fachada norte, sendo que um mede temperaturas do ar, T5, e o outro sensor mede temperaturas superficiais, T1.

Relativamente à temperatura verifica-se que a temperatura superficial média é inferior à do ar, existindo pontualmente o inverso embora a diferença entre temperaturas seja pouca, ou seja neste momento a quantidade de energia acumulada nas espessas paredes durante Verão já foi dissipada. Embora a temperatura superficial média seja inferior à não é o suficiente para que o ar em contacto com a parede baixe a temperatura de tal forma que aumente significativamente os valores de humidade relativa.

Quanto à humidade relativa verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, sendo os seus valores localizados entre os 50% e os 66%.

Embora a temperatura média superficial seja inferior à temperatura média do ar a diferença entre as temperaturas médias é muito pouca pelo que a humidade relativa superficial nunca se aproxima das condições de saturação.

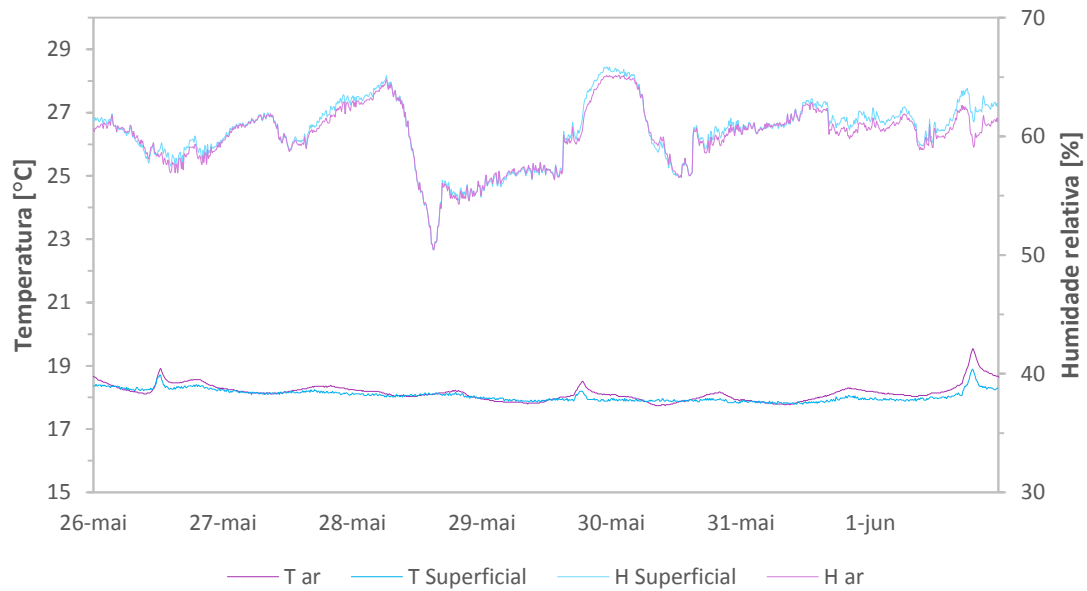


Figura 7.31 - Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 26 de Maio e 1 de Junho

7.1.2.4 Verão

Para a análise dos efeitos do Verão no edifício foi escolhida a semana já próxima do final de registo de leituras, nomeadamente de 30 de Junho a 6 de Julho.

Encontra-se representado na figura 7.32 a evolução da temperatura no exterior, no desvão da cobertura e no interior da nave principal a uma altura de 3,90m e na tabela 7.4 encontra-se a temperatura máxima e mínima para cada dia, assim como a hora onde se verificam os respectivos picos.

Tal como anteriormente verifica-se que os ciclos diários no interior acompanham os ciclos diários no exterior embora seja de forma menos sinuosa e com um atraso em relação ao exterior. Neste período a temperatura média do desvão é inferior à temperatura média no exterior, pois a cobertura exerce resistência térmica sendo também esta resistência térmica responsável pelo atraso nos ciclos diários e pelos ciclos serem menos sinuosos.

Através da tabela 7.4 verifica-se que os picos do desvão acontecem sempre após os picos no exterior, excepto no dia 2 que acontece antes, assim como se verifica que neste dia a temperatura máxima no desvão seja superior à temperatura máxima no exterior. Este facto pode ser justificado por neste dia a temperatura no exterior descer de forma brusca e muito rápida, que o desvão acompanha mas de forma menos brusca e mais lenta devido à resistência térmica da cobertura e à fraca ventilação existente no desvão da cobertura.

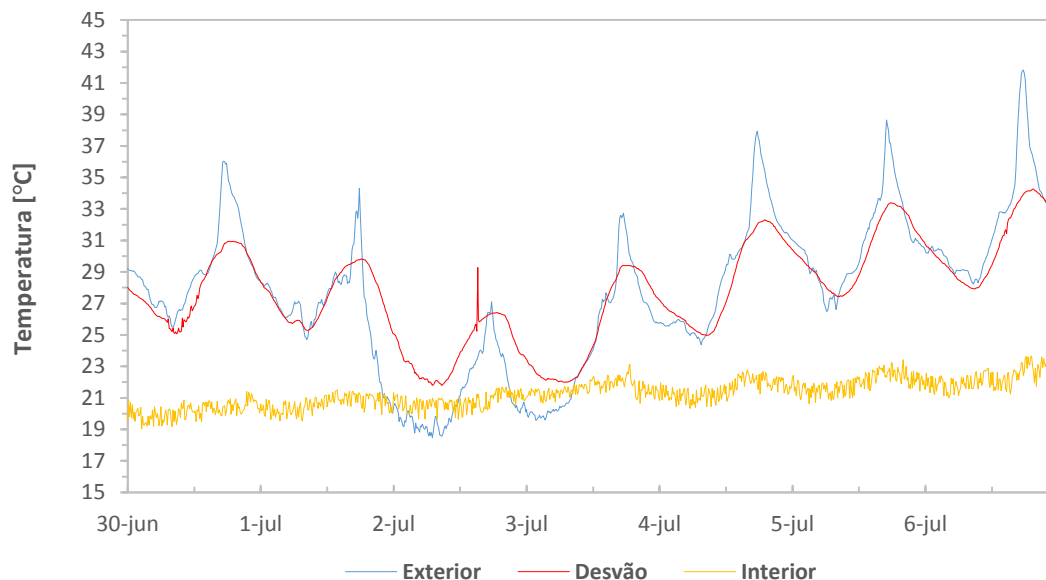


Figura 7.32 - Evolução da temperatura no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho de 2013

Conclui-se que a cobertura é responsável por os picos máximos e mínimos no desvão serem inferiores aos do exterior, assim como existir um atraso nos ciclos diários relativamente aos ciclos diários registados no exterior.

Capítulo 7. Análise e discussão de resultados

No interior verifica-se que os ciclos diários são mais ténues do que no exterior, assim como apresentam um atraso. Isto deve-se ao facto de o edifício apresentar uma forte inércia térmica mantendo as condições no interior bastante estáveis.

Tabela 7.4 – Temperatura máxima e mínima no exterior, desvão da cobertura e no interior a meio da nave principal no período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho de 2013

Dia		Exterior		Desvão		Interior	
		Hora	Temperatura	Hora	Temperatura	Hora	Temperatura
Domingo 30	Máximo	17:50	36,0	18:10	30,9	21:30	21,4
	Mínimo	08:10	25,5	08:50	25,1	02:30	19,0
Segunda 1	Máximo	17:50	34,3	18:10	29,8	13:50	21,5
	Mínimo	23:50	20,0	23:50	25,1	07:30	19,5
Terça 2	Máximo	17:40	27,1	15:10	29,3	20:20	21,7
	Mínimo	07:00	18,5	08:40	21,8	11:40	19,6
Quarta 3	Máximo	17:30	32,7	17:30	29,4	18:40	23,1
	Mínimo	01:40	19,6	06:40	22,0	20:30	20,7
Quinta 4	Máximo	17:40	37,9	19:00	32,3	15:30	22,8
	Mínimo	07:30	24,4	08:30	25,0	05:30	20,3
Sexta 5	Máximo	17:00	38,6	17:40	33,4	20:00	23,4
	Mínimo	06:10	26,5	08:30	27,4	03:00	20,6
Sábado 6	Máximo	17:40	41,8	19:20	34,3	22:20	23,7
	Mínimo	08:40	28,2	08:50	27,9	04:10	21,0

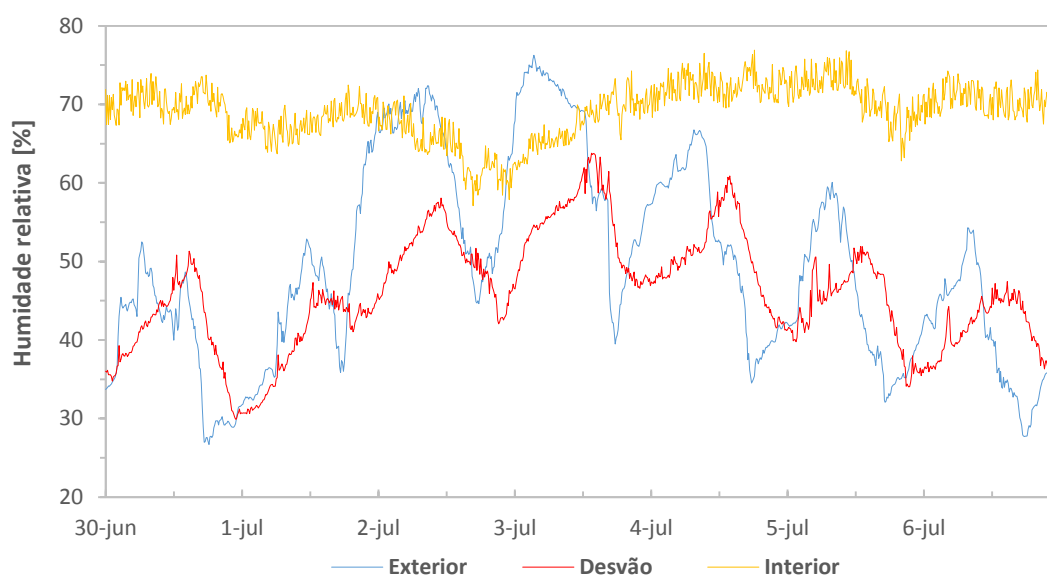


Figura 7.33 - Evolução da humidade relativa no exterior, no desvão e no interior a meio da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho de 2013

Representado na figura 7.33 encontra-se a evolução da humidade relativa no exterior, no desvão da cobertura e no interior da nave principal a uma altura de 3,90m.

No desvão da cobertura verifica-se que a humidade relativa é mais baixa do que nas estações anteriores, encontrando-se compreendida entre os 30% e os 63%.

No interior, tal como na Primavera, verifica-se que os ciclos diários são mais sinuosos do que no Outono e no Inverno estando a humidade relativa compreendida entre os 57 e os 77%.

Na figura 7.34 encontra-se a evolução da temperatura e humidade relativa na casa mortuária, na sacristia, altar-mor e na nave principal.

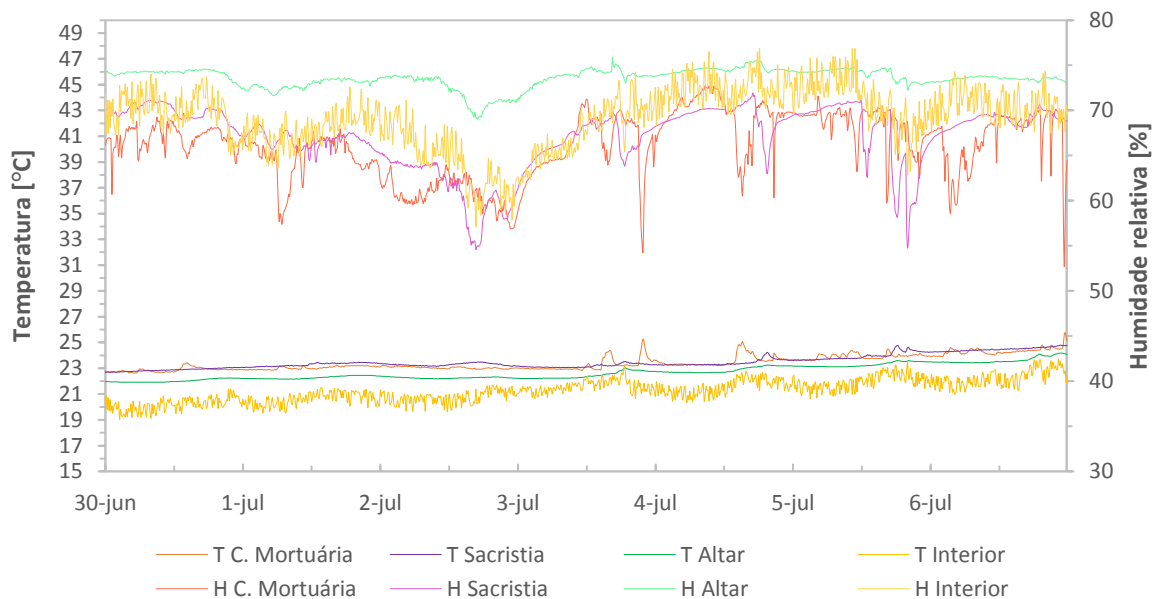


Figura 7.34 - Evolução da temperatura e humidade relativa, na casa mortuária, na sacristia, no altar-mor e no centro da nave principal a 3,90m de altura para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho

Verifica-se que durante este período é na nave principal que se registam as temperaturas mais baixas, devido à nave se encontrar no centro do edifício não sendo tão influenciada, quanto a sacristia e a casa mortuária pelas temperaturas exteriores. Na casa mortuária é onde se regista a temperatura média mais elevada, pois este compartimento encontra-se orientado a sul, recebendo maior radiação solar. Os valores intermédios são obtidos na sacristia e no altar, sendo os valores do altar-mor mais baixos do que na sacristia devido ao altar-mor se encontrar numa zona enterrada dispondo de maior inércia térmica.

Em termos de humidade relativa verifica-se que os valores mais elevados são registados no altar-mor enquanto os mais baixos são na sacristia, encontrando-se compreendida entre os 53% e os 76%.

Encontra-se representado na figura 7.35 a evolução da temperatura e da humidade relativa junto ao púlpito norte ao longo de uma coluna vertical composto pelos termopares T11, T5, T8 e T12 que se encontram colocados a alturas referentes ao pavimento de 0,15m, 3,90m, 7,50m e 10,00m

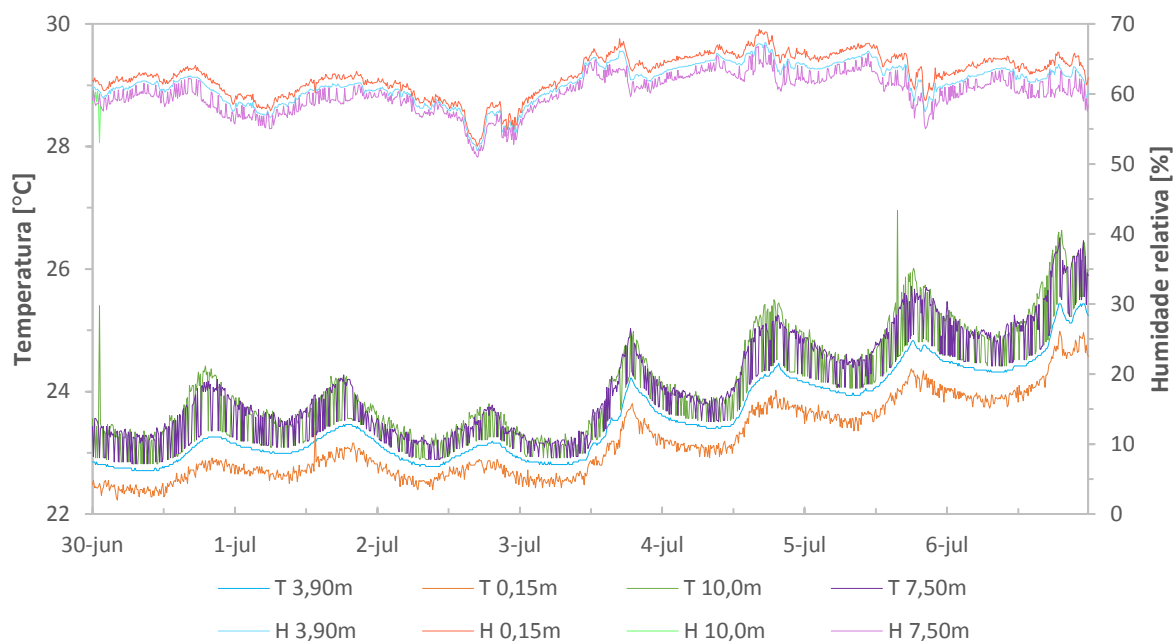


Figura 7.35 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de uma coluna vertical junto do púlpito norte para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho

Em termos de temperatura verifica-se que os valores mais elevados se registam junto da cobertura, tendo uma evolução decrescente até ao pavimento. Este efeito já era esperado desde que as temperaturas exteriores começaram a subir mas devido à forte inercia térmica da igreja só se verificou a estratificação por temperaturas no final de Junho. Conclui-se que neste período já não existem correntes convectivas, existindo uma estratificação do ar por temperaturas.

No que respeita à humidade relativa existe uma disposição inversa à da temperatura, sendo os valores mais elevados de humidade relativa obtidos junto do pavimento e os valores mais baixos junto do tecto. Neste período a humidade relativa encontra-se compreendida entre os 51,1% e os 68,9%.

Na figura 7.36 encontra-se representado a evolução da temperatura e da humidade relativa ao longo de um corte transversal junto dos púlpitos.

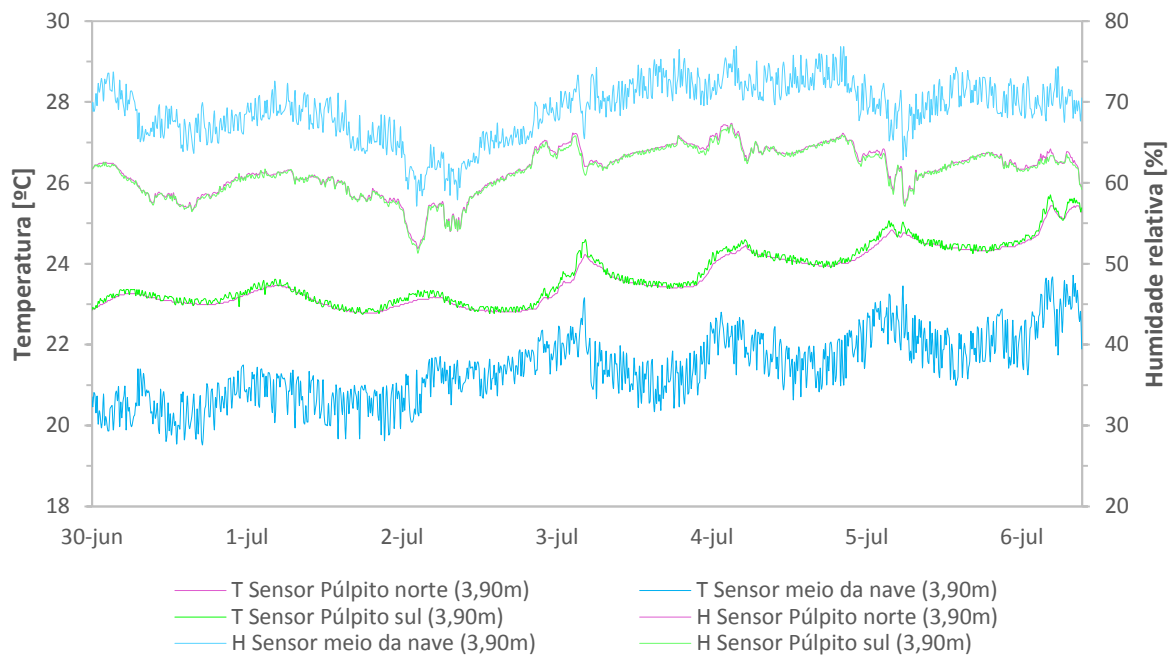


Figura 7.36 - Evolução da temperatura e humidade relativa ao longo de corte transversal junto dos púlpitos para um período compreendido entre 30 de Junho e 6 de Julho

Tal como no ponto 7.1.2.3 verifica-se que é no centro da nave principal que se registam temperaturas bastante mais baixas do que as registadas nos púlpitos embora no período de Verão os valores sejam mais elevadas do que na Primavera. O facto de os valores mais baixos serem obtidos no centro da nave principal deve-se à interioridade deste sensor. A temperatura média do sensor localizado no púlpito sul é superior à do púlpito norte devido à lateral sul se encontrar mais exposta à radiação solar directa.

Em termos de humidade relativa verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, sendo os valores mais elevados obtidos no centro da nave principal, os mais baixos no sensor colocado na parte sul da igreja. A humidade relativa máxima durante este período foi de 78%.

Na figura 7.37 encontra-se a evolução da temperatura e humidade relativa para dois sensores colocados a 3,90 m na fachada norte, sendo que um mede temperaturas do ar, T5, e o outro sensor mede temperaturas superficiais, T1.

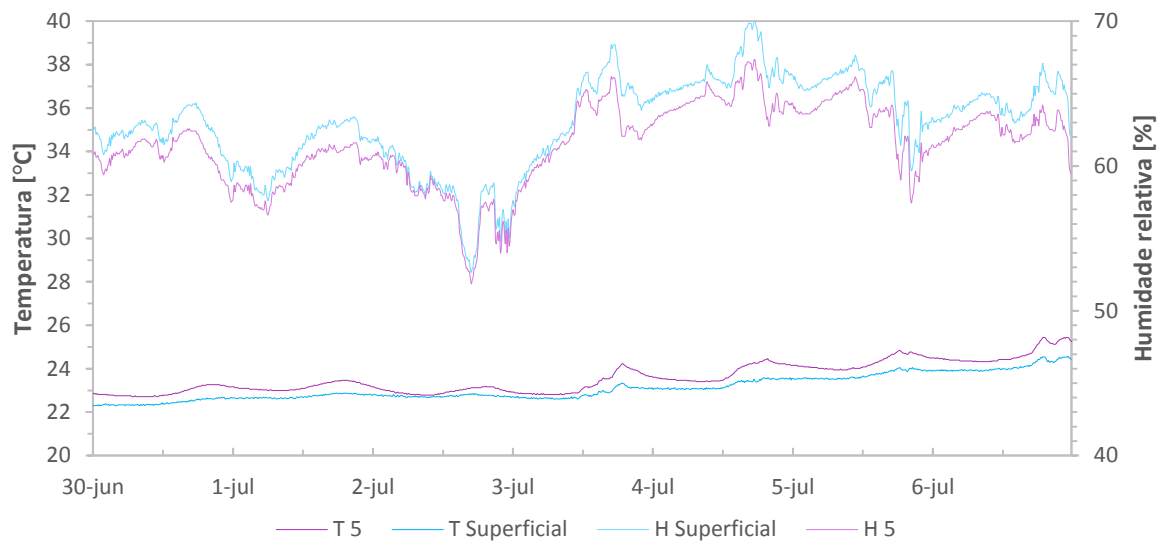


Figura 7.37 - Evolução da temperatura e humidade relativa superficial e do ar a 3,90 m entre 30 de Junho e 6 de Julho

No que respeita à temperatura verifica-se que os valores da temperatura superficial são inferiores aos do ar, ou seja, tal como do ponto 7.1.2.3 neste período em análise a quantidade de energia acumulada nas espessas paredes durante Verão do ano 2012 já foi dissipada.

A humidade relativa apresenta disposição inversa à temperatura com valores compreendidos entre os 51,9% e os 69,5%.

7.2 Monitorização manual

Além da monitorização automática foi também realizada uma monitorização manual de modo a tornar mais precisa a análise do microclima interior da nave principal da igreja. Para tal foram realizadas duas baterias de leitura de temperatura e humidade relativa do ar ao longo da nave, medições de temperatura superficial das paredes e pavimento, e captura de imagens de termografia.

Para a realização das baterias de medição de temperatura e humidade relativa foi utilizado um Hobo U12-13, que realizou a medição da temperatura e humidade relativa ao longo de 34 pontos em planta a 4 alturas diferentes.

As temperaturas superficiais foram recolhidas em 17 pontos distribuídos pelo interior da nave principal, com o intuito de verificar a existência de condensações superficiais. Para tal utilizou-se um aparelho da marca Roline que permite fazer a leitura da temperatura numa superfície.

Para a captura de imagens de termografia utilizou-se uma câmara de termografia modelo ThermaCAM B4 da marca FLIR. Foi definida uma emissividade de 0,96 para recolher as imagens no interior da nave principal. Estas imagens permitem complementar a análise do microclima presente no interior da nave principal, assim como verificar os locais onde existe perdas e ganhos térmicos.

7.2.1 Bateria de medição da temperatura e humidade relativa

Nos dias 18 Janeiro e 24 de Abril de 2013 realizou-se um conjunto de medições com recurso a um Hobo U12-13 com o intuito de perceber de modo mais preciso as condições higrotérmicas do clima interior da igreja. Para tal realizou-se medições em 34 pontos em planta e 4 alturas diferentes.

Este conjunto de pontos permitem definir planos horizontais e planos verticais, longitudinais e transversais, no interior da nave principal o que torna possível traçar mapas de isolinhas e representações tridimensionais com recurso ao software *Surfer* da Golden Software.

7.2.1.1 Inverno – 18 de Janeiro de 2013

Encontra-se na figura 7.38 o mapeamento horizontal de temperaturas e na figura 7.39 uma representação tridimensional da temperatura num plano horizontal, ambas a uma altura de 2,85 m. Através deste mapa de isolinhas é possível observar que ao longo da nave principal as temperaturas apresentam variações muito pequenas, sendo o valor mínimo de 14,9°C e o valor máximo de 15,6°C. Esta estabilidade de temperaturas pode ser justificado pelo facto de a igreja se encontrar fechada, excepto nas alturas que se celebra a missa. Observa-se que as zonas com as temperaturas mais elevadas são junto da porta de entrada da sacristia e na zona central da nave principal, enquanto as zonas onde se verificam as temperaturas mais baixas é junto do altar-mor e da porta de entrada.

Verifica-se, tal como seria de esperar e como já se encontra justificado no ponto 7.1.2.2, que a zona sul apresenta temperaturas superiores às da zona norte.

O facto de nos primeiros 4 metros junto da entrada principal a temperatura tomar valores mais baixos, justificado pelo facto de esta zona se encontrar mais exposta às temperaturas do exterior que durante o Inverno são mais baixas do que no interior. No ponto 7.1.1, procedeu-se à análise da figura 7.9 onde se encontra representado o andamento do termopar T15, localizado junto da porta principal. Durante essa análise foi referido que seria de esperar que esse sensor durante o Inverno também sofresse influência das temperaturas exteriores, mas tal não se verificou. Este facto pode ser justificado por o termopar T15 já se encontrar a mais de 4m da porta principal, ou seja, já se encontrar a uma distância da porta principal que não se encontra exposta às temperaturas do exterior.

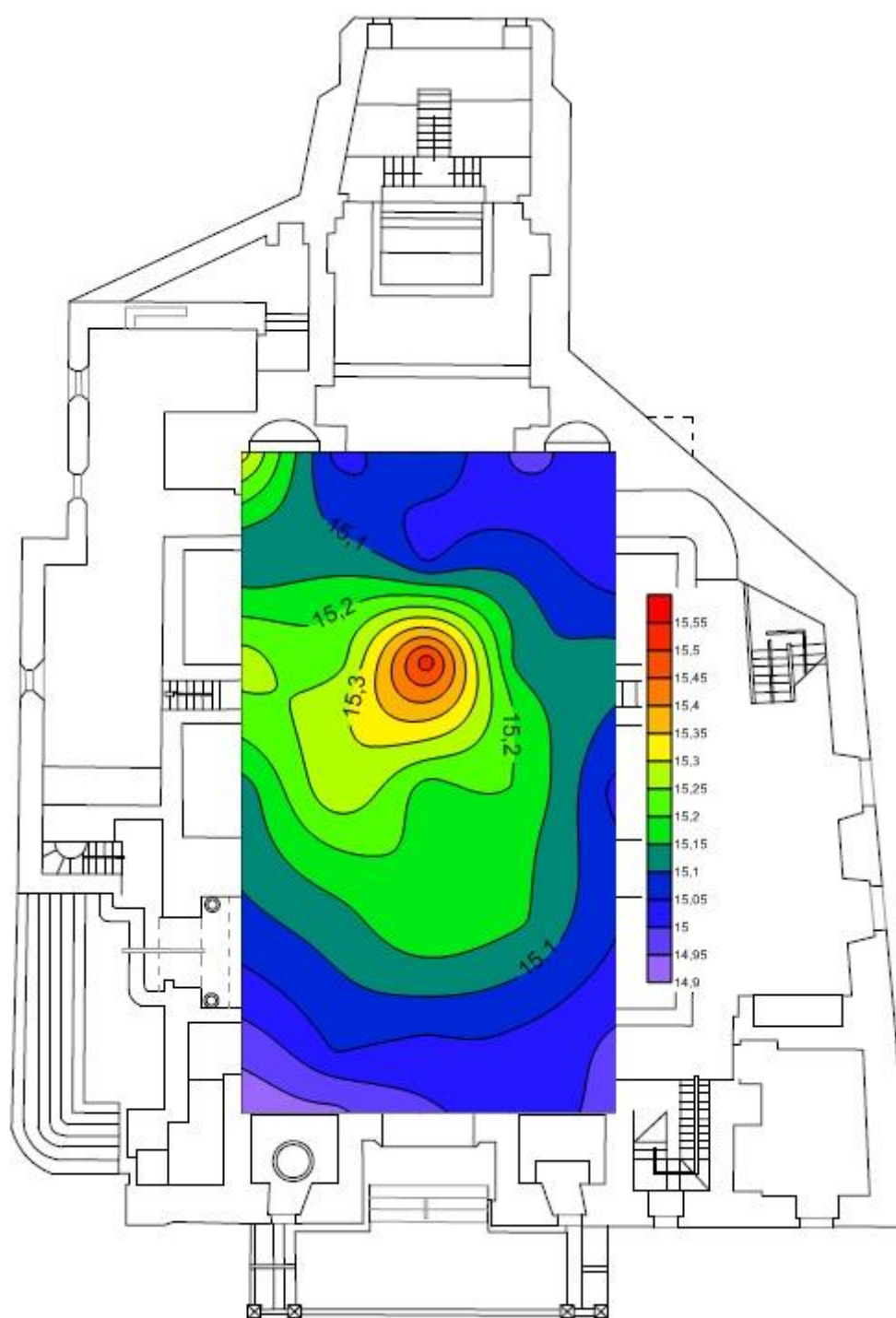


Figura 7.38 - Mapeamento horizontal de temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013

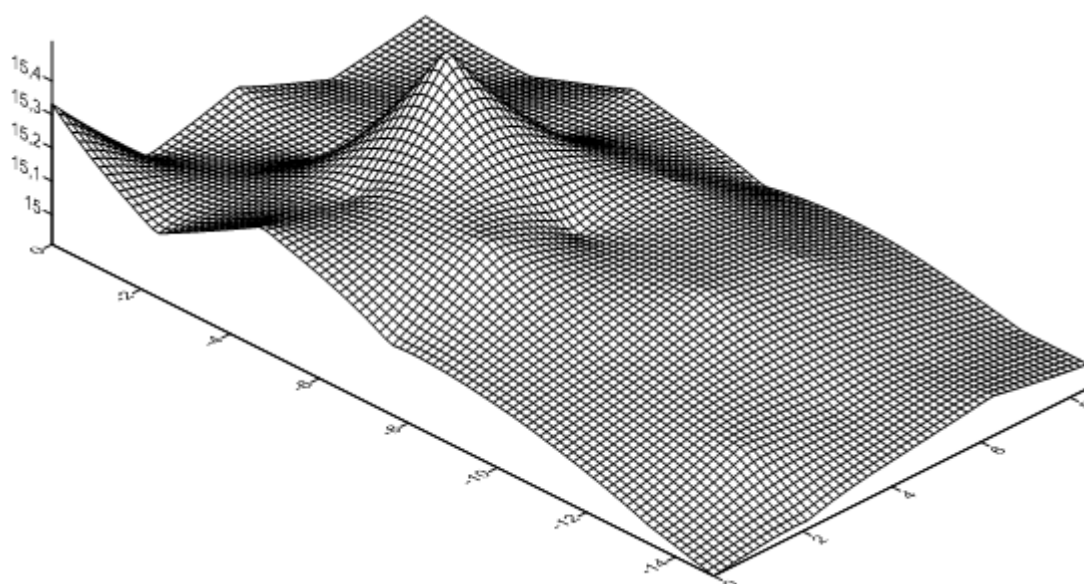


Figura 7.39 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013

Encontra-se na figura 7.40 o mapeamento horizontal de humidade relativa e na figura 7.41 uma representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal, ambas a uma altura de 2,85 m. Verifica-se a humidade relativa na nave principal varia entre os 76,4 % e os 81%, ou seja, existe pouca variação de valores de humidade relativa.

Observa-se que os valores mais baixos ocorrem junto da sacristia, no mesmo local onde se registaram as temperaturas mais elevadas. Verifica-se que os valores mais elevados ocorrem junto da porta principal, ou seja onde se registaram as temperaturas mais baixas. Os valores intermédios ocorrem junto do altar-mor.

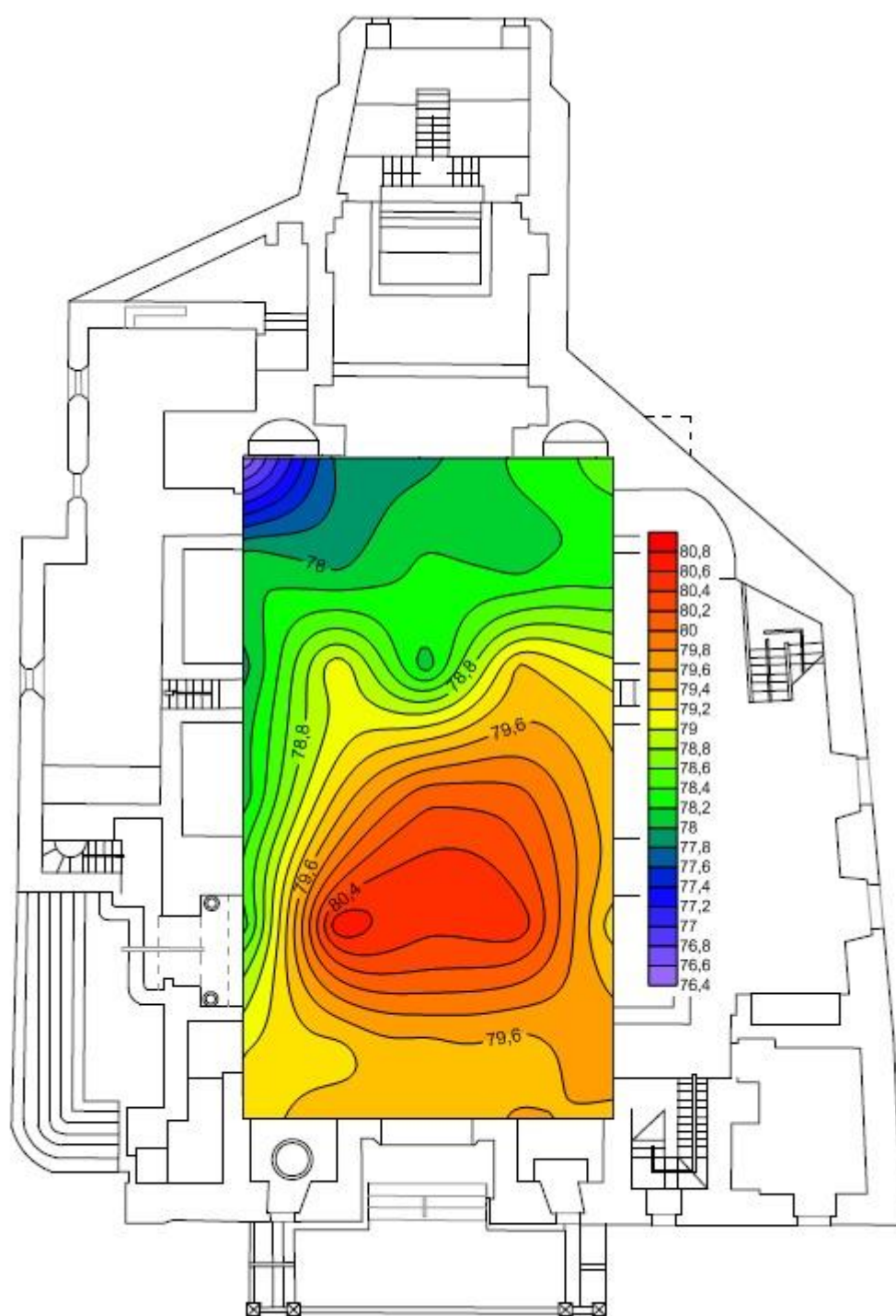


Figura 7.40 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013

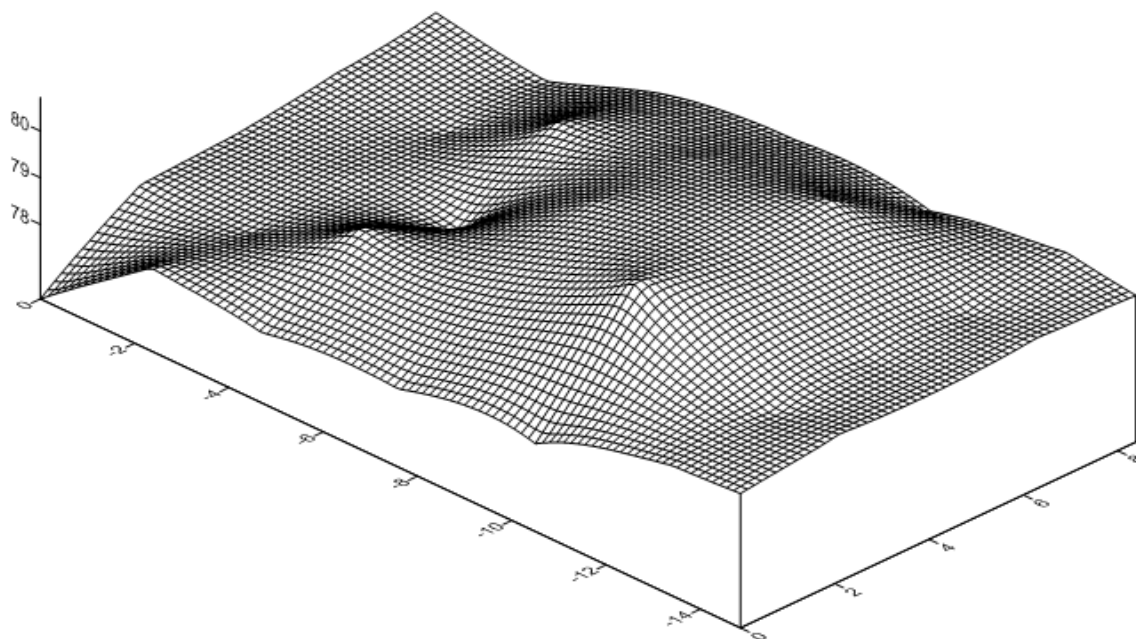


Figura 7.41 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 18 de Janeiro de 2013

Na figura 7.42 encontra-se o mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal que passa pelo centro da nave principal. Trata-se de um mapa de isolinhas colorido, no qual é possível observar que não existe estratificação do ar por temperaturas, como já se tinha observado durante a análise da figura 7.8.

Verifica-se que as zonas mais frias são, tal como já observado na figura 7.38, junto do altar e da porta principal aumentando com a aproximação da zona central da nave e praticamente constantes até ao tecto. A cerca de 5 metros do altar verifica-se um pico de máximo junto do pavimento, diminuindo gradualmente conforme se aproxima do tecto. É de salientar que embora exista variações estas são muito pequenas, sendo a variação máxima de 0,7°C.

Encontra-se na figura 7.43 o mapeamento vertical da humidade relativa ao longo de um corte longitudinal que passa pelo centro da nave principal. Verifica-se que as humidades relativas mais elevadas se encontram junto da porta principal, sendo o máximo de obtido a cerca de 3,45 m da porta principal junto do tecto. Já era de esperar que nesta zona existisse humidade relativa elevada visto ser uma das zonas mais frias da nave.

Na zona do altar-mor são onde existe as humidades relativas mais baixas, mas seria de esperar o contrário visto ser uma zona onde se observam temperaturas mais baixas.

Verifica-se que a humidade relativa é praticamente constante em altura mas na parte central da nave, onde existe o pico máximo de temperatura junto do pavimento que diminui consoante de aproxima da cobertura, a humidade relativa aumenta do pavimento até à temperatura.

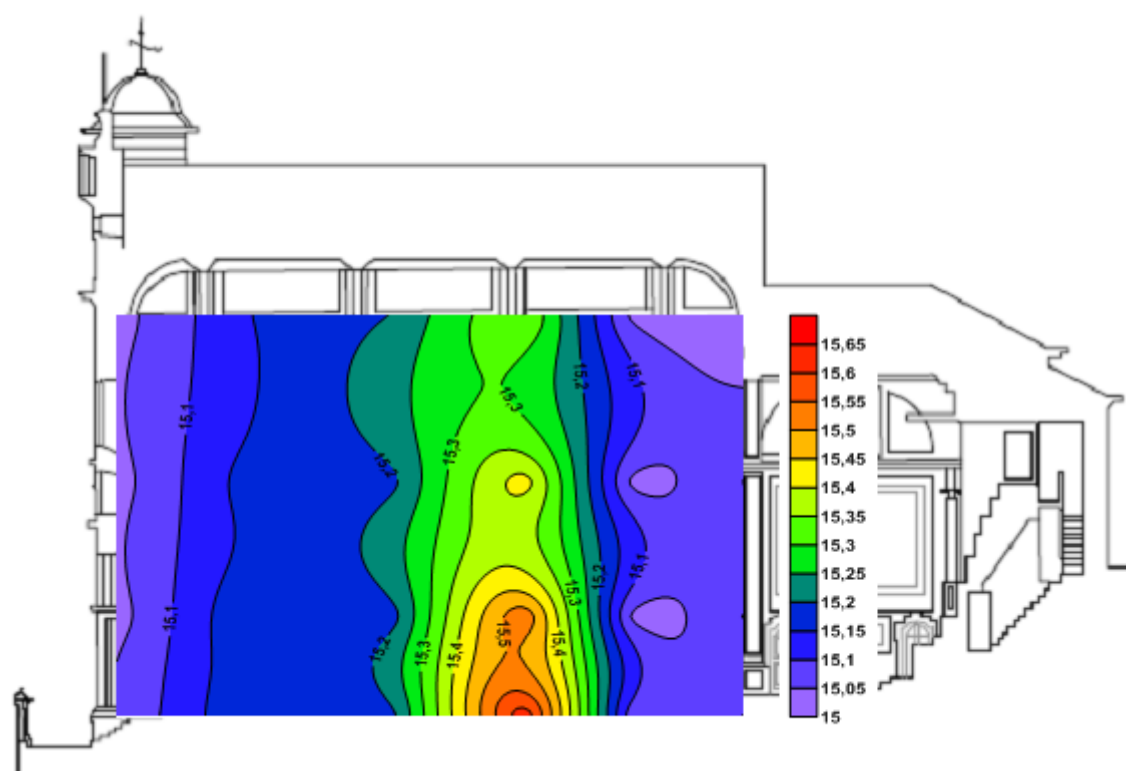


Figura 7.42 - Mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 18 de Janeiro de 2013

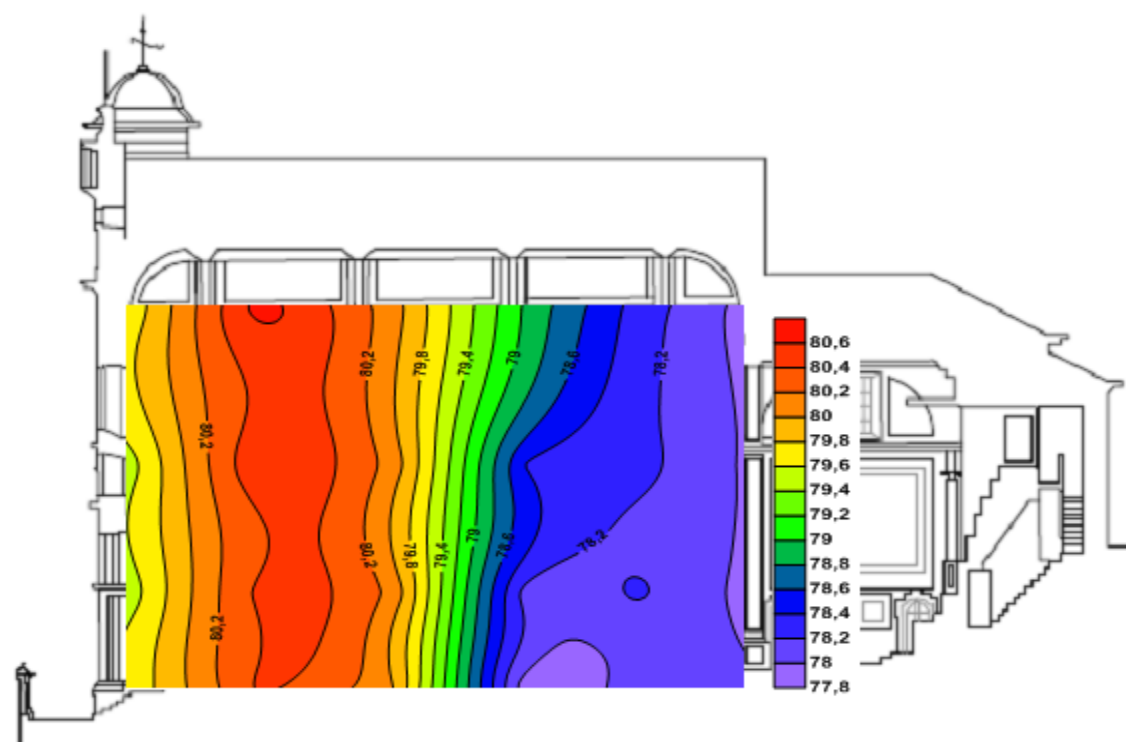


Figura 7.43 - Mapeamento vertical da humidade relativa ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 18 de Janeiro de 2013

7.2.1.2 Primavera – 24 de Abril de 2013

Encontra-se na figura 7.44 o mapeamento horizontal de temperaturas e na figura 7.45 uma representação tridimensional da temperatura num plano horizontal, ambas a uma altura de 2,85 m.

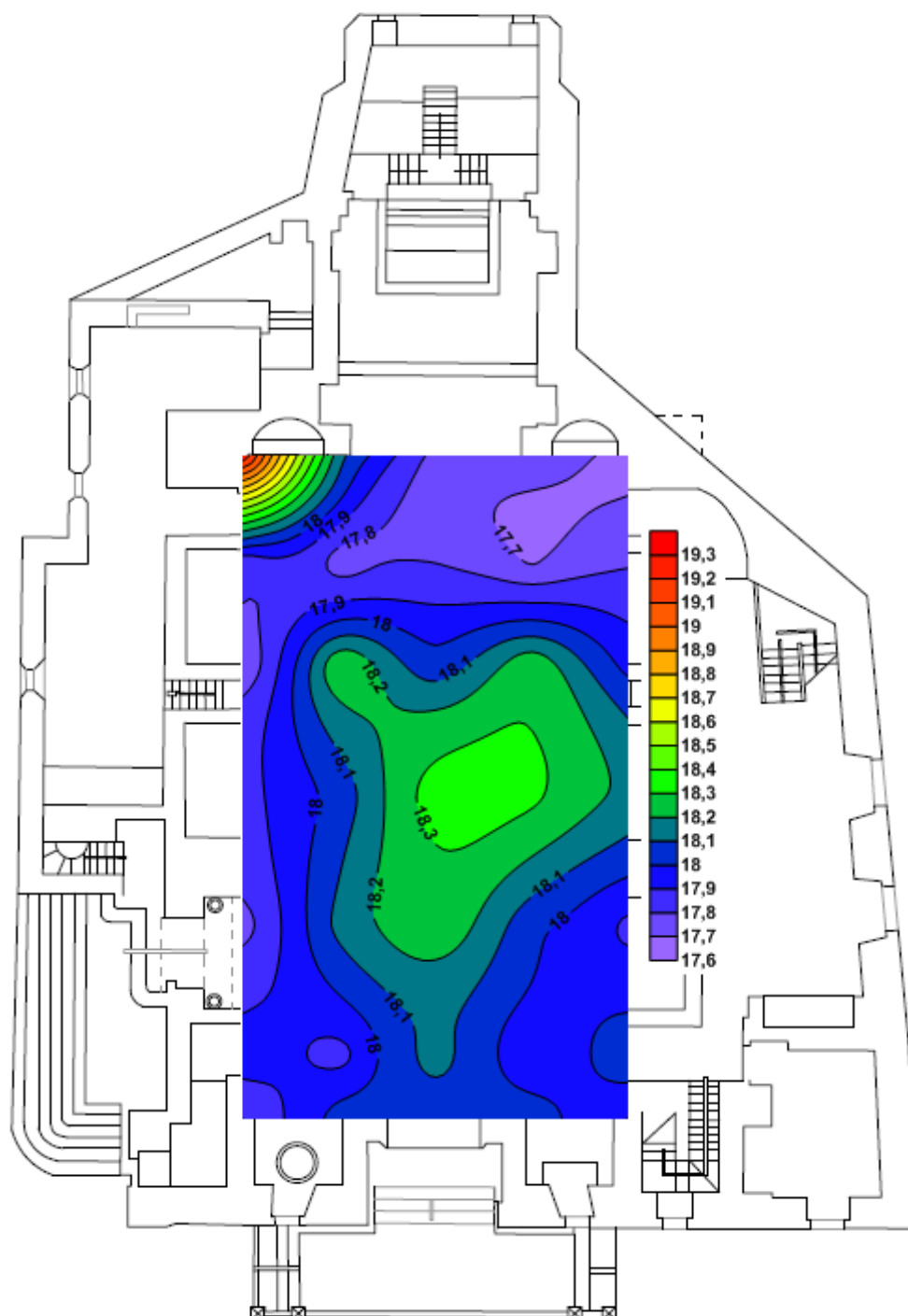


Figura 7.44 - Mapeamento horizontal de temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013

Através do mapa de isolinhas e da representação tridimensional observa-se junto da porta da sacristia é onde se localiza o pico máximo de temperatura, enquanto que na zona que dá acesso à casa mortuária existe uma diminuição da temperatura, onde se localiza o pico mínimo. Seria de esperar o inverso visto que a sacristia se encontra orientada a norte, onde a temperatura é mais baixa, e a casa mortuária é orientada a sul, onde a temperatura é mais elevada.

A maior variação de temperatura ocorre junto da porta da sacristia, numa área com cerca de 4 m², existindo na restante área da nave verifica-se uma variação de temperatura muito pequena. O facto de existir pouca variação de temperatura pode ser justificado por a igreja se encontrar fechada, excepto nas alturas que se celebra a missa.

Observa-se que a temperatura na zona central é mais elevada que junto das paredes devido ao facto de as paredes ainda se encontrarem sobre a influência das temperaturas de Outono/Inverno apresentando temperaturas mais baixas do que as do ar. Verifica-se ainda que a a na zona norte da nave as temperaturas são mais baixas do que na zona sul, tal como já foi referido no ponto 7.1.2.3.

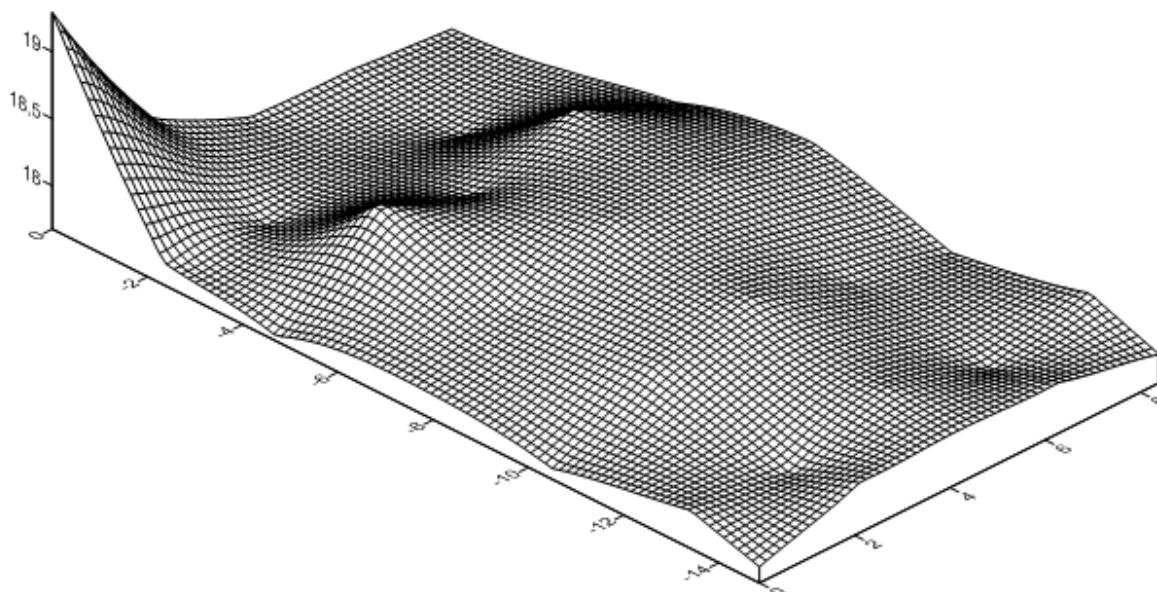


Figura 7.45 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013

Encontra-se na figura 7.46 o mapeamento horizontal de humidade relativa e na figura 7.47 uma representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal, ambas a uma altura de 2,85 m. Junto da porta da sacristia, tal como para a temperatura era lá que se observa o valor máximo, é onde se verifica o mínimo de humidade relativa. É possível verificar que o inverso acontece junto da porta da casa mortuária, ou seja neste local a humidade relativa apresenta valores elevados, sendo aí registado valores de temperatura baixos. Consegue-se verificar que na restante área a variação de humidade relativa é muito pequena.

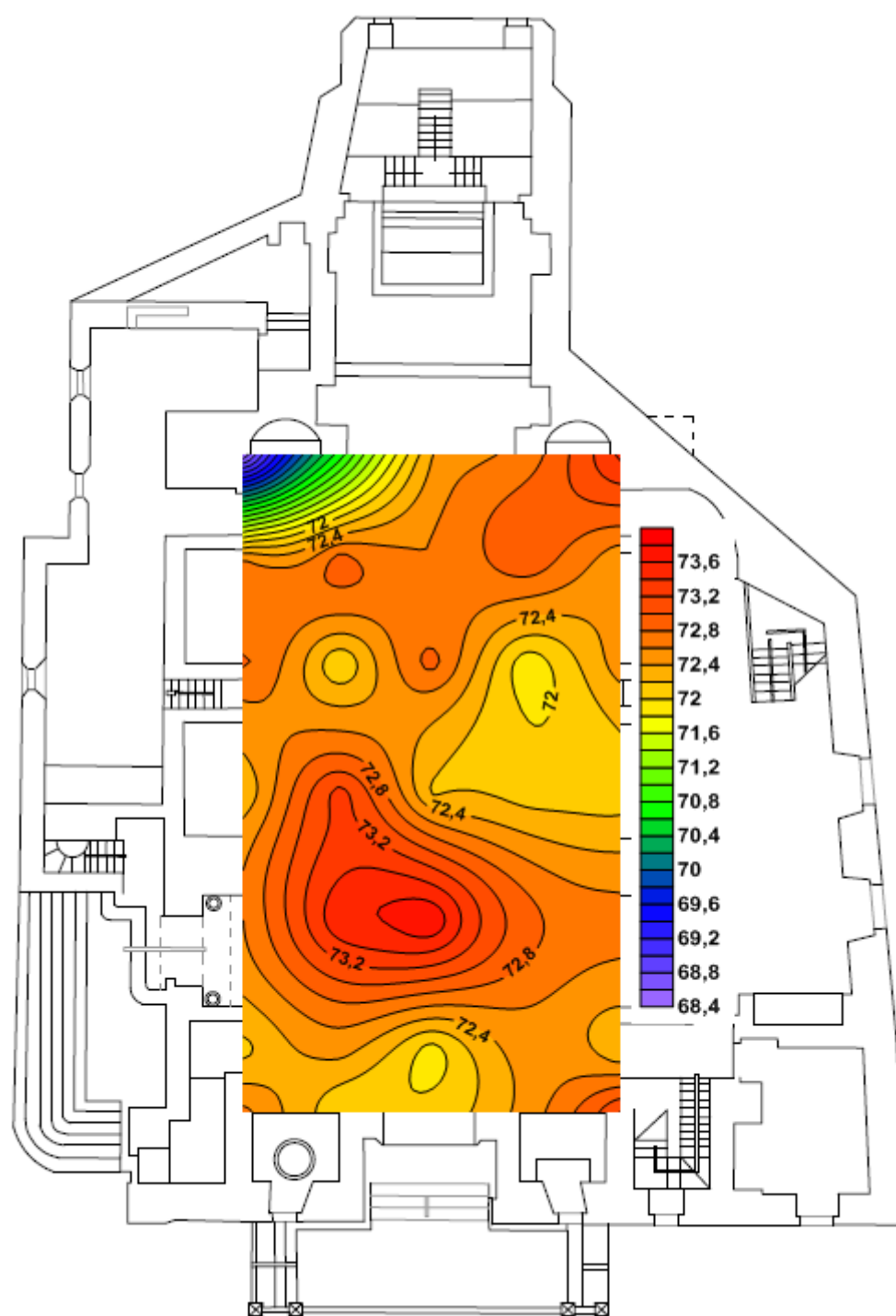


Figura 7.46 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013

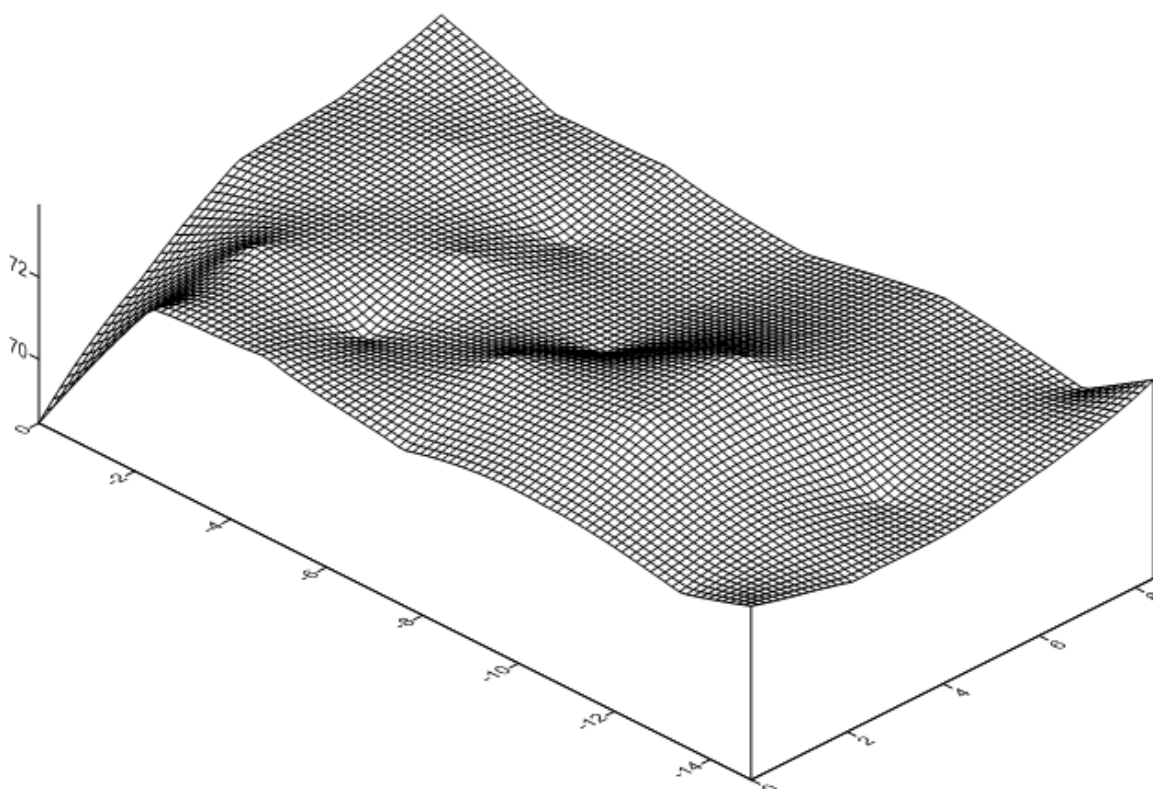


Figura 7.47 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2,85 m no dia 24 de Abril de 2013

Na figura 7.48 encontra-se o mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal que passa pelo centro da nave principal. Verifica-se que não existe estratificação do ar por temperaturas, embora já se encontre na Primavera, confirmando o que analisou na figura 7.8.

Consegue-se verificar que conforme se avança da porta principal para o centro da nave principal a temperatura aumenta atingindo o valor máximo nesse local. A partir dessa zona começa a diminuir gradualmente até ao altar, onde ocorrem os valores mais baixos.

Encontra-se na figura 7.49 o mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal que passa pelo centro da nave principal. Ao longo deste corte a humidade relativa apresenta variações muito pequenas, encontrando-se sempre os 71,8% e os 73,9%, utilizando-se por isso uma escala muito fina.

Verifica-se que os valores máximos ocorrem no centro da nave contrariando a tendência das temperaturas verificada na figura 7.48, pois ocorre na mesma zona que se verificam as temperaturas máximas. Os valores mínimos de humidade relativa ocorrem junto do altar, contrariando mais uma vez a tendência da temperatura, pois é onde ocorre as temperaturas mais baixas. Também é possível observar que a humidade relativa tem tendência a aumentar conforme se aproxima da cobertura. Estes três fenómenos podem ser justificados pelo facto de a nave principal apresentar uma ventilação deficiente.

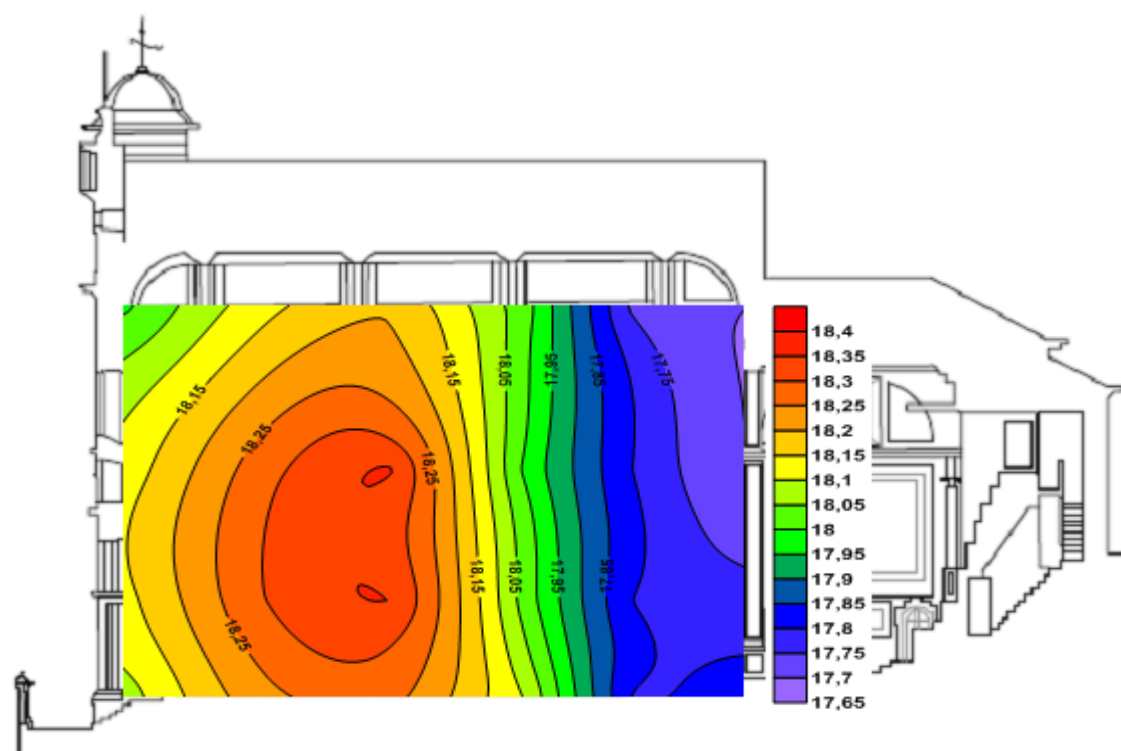


Figura 7.48 - Mapeamento vertical da temperatura ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 24 de Abril de 2013

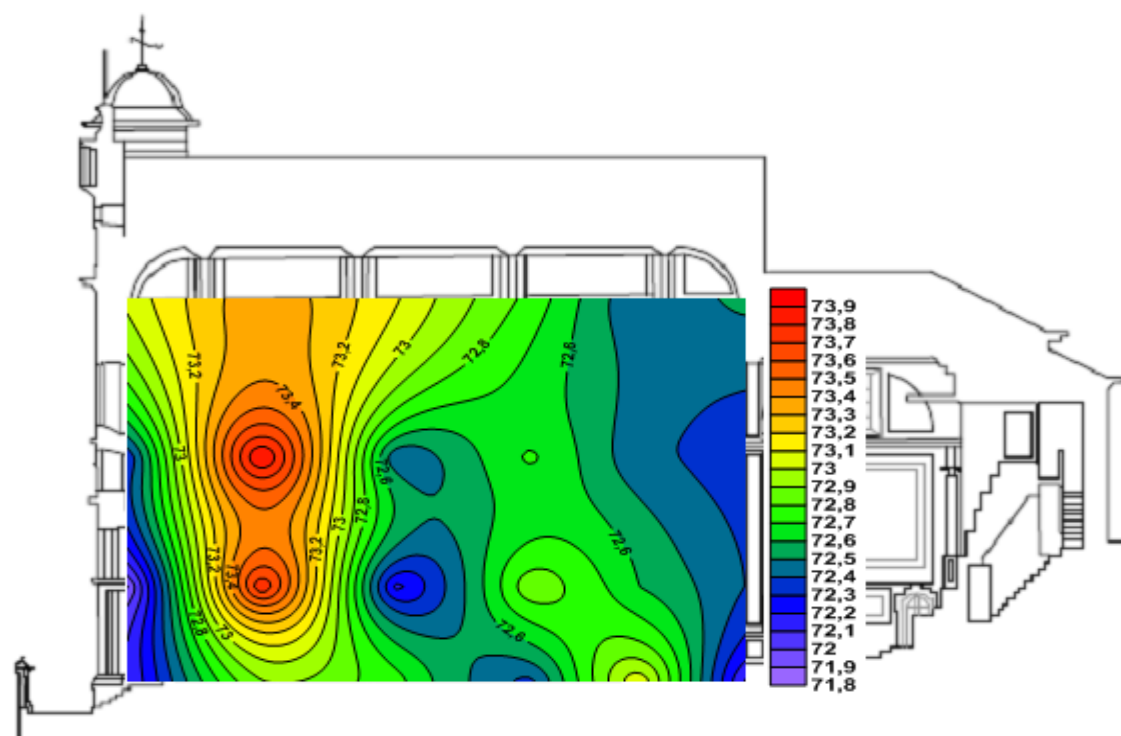


Figura 7.49 - Mapeamento vertical da humidade relativa ao longo de um corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal no dia 24 de Abril de 2013

7.2.2 Medição de temperaturas superficiais

Durante este estudo foram realizadas, pontualmente, medições de temperaturas superficiais das paredes, tecto e pavimento da nave principal da igreja através de um aparelho de medição de temperatura superficial e da câmara de termografia.

Através da medição da temperatura superficial é possível realizar o cálculo da concentração de saturação e da humidade relativa para cada ponto, tal como descrito no ponto 1.3.2.3.

Encontra-se na tabela 7.5 a temperatura superficial e a humidade relativa, para cada local, no dia 4 de Março de 2013.

Pode-se verificar que as temperaturas superficiais apresentam pequenas variações, encontrando-se compreendidas entre 12,8°C e os 14,1°C.

A humidade relativa também apresenta pequenas variações estando compreendida entre 68,5% e os 73,2%, ou seja, não são verificadas condições de saturação.

Tabela 7.5 – Temperatura superficial e humidade relativa no dia 4 de Março de 2013

Local	Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]
1 – Pavimento – Degrau Norte	13,5	70,2
2 – Pavimento	13,2	71,6
3 – Fachada Norte - Púlpito	13,1	71,9
4 – Fachada Norte - Entrada	12,8	73,2
5 – Fachada Norte - Púlpito	13,0	72,4
6 – Fachada Sul – Púlpito	13,1	72,1
7 – Fachada Sul - Entrada	13,0	72,5
8 – Pavimento - Entrada	13,4	71,2
9 – Pavimento – Degrau Sul	13,7	69,9
10 – Corredor	14,1	68,5
11 – Início do Altar - Sul	13,3	71,5
12 – Início do Altar - Norte	13,4	71,2
13 – Início do Altar - Pavimento	13,4	71,2
14 – Altar - Pavimento	13,6	70,4
15 – Altar - Pavimento	13,2	72,1
16 – Altar Sul	13,1	72,5
17 – Pavimento Altar	13,3	72,0

Na figura 7.50 encontra-se uma imagem termográfica na zona do púlpito norte e na figura 7.51 uma imagem fotográfica dessa mesma zona. Nesta zona a temperatura das superfícies varia entre 12,3°C e 13,5°C. Verifica-se que este local a zona onde as temperaturas superficiais são mais baixas é a no nicho de altar ao lado do púlpito norte que pode ser justificado pelo

facto de o nicho de altar ser recuado, relativamente à nave, pelo que sofre menos influência da radiação solar que entra através das janelas e pela presença de pessoas.

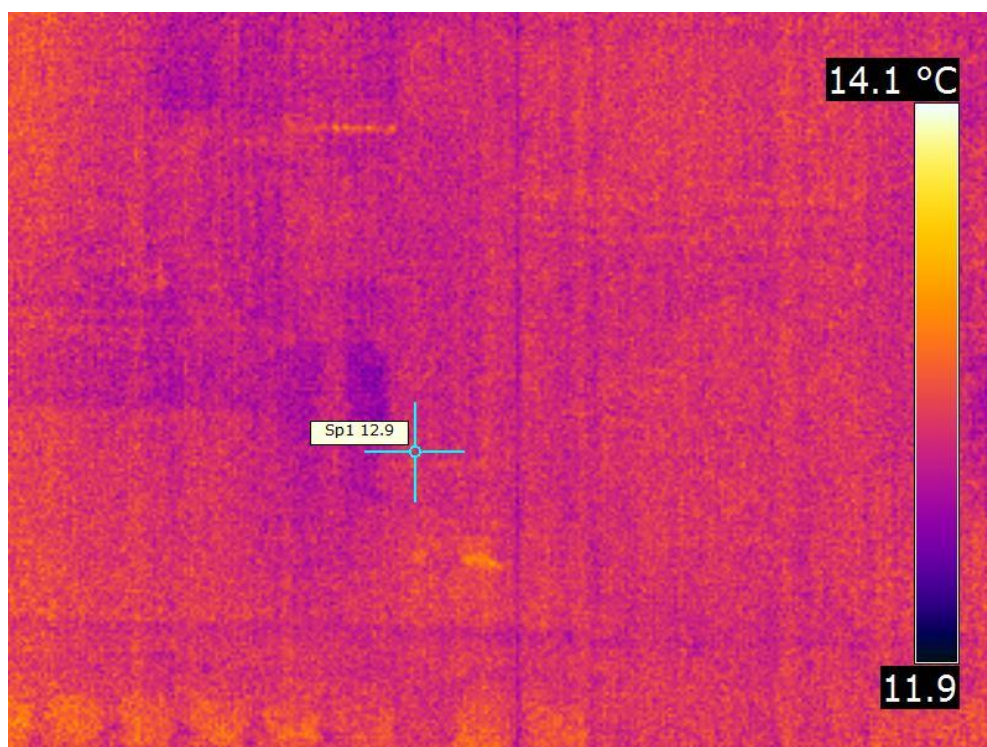


Figura 7.50 - Imagem termográfica do púlpito norte no dia 4 de Março de 2013

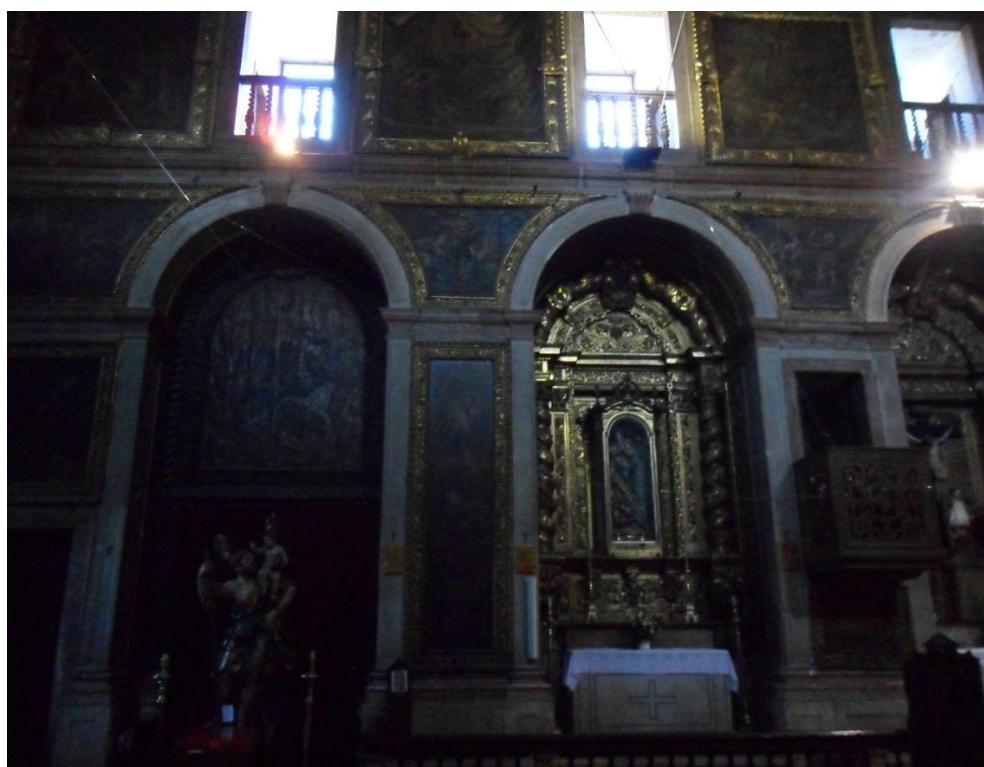


Figura 7.51 – Fotografia do púlpito norte

Na figura 7.52 encontra-se uma imagem termográfica na zona do púlpito sul e na figura uma imagem fotográfica dessa mesma zona. Nesta zona a temperatura varia entre os 12,2°C e os 14,1°C. Neste lado verifica-se que à semelhança do da zona do púlpito norte as temperaturas superficiais mais baixas verificam-se na zona do nicho de altar. A zona da junto da porta é onde se verificam as temperaturas mais elevadas que pode ser justificado pelo facto de o nicho de altar ser recuado, relativamente à nave, pelo que sofre menos influência da radiação solar que entra através das janelas e pela presença de pessoas.

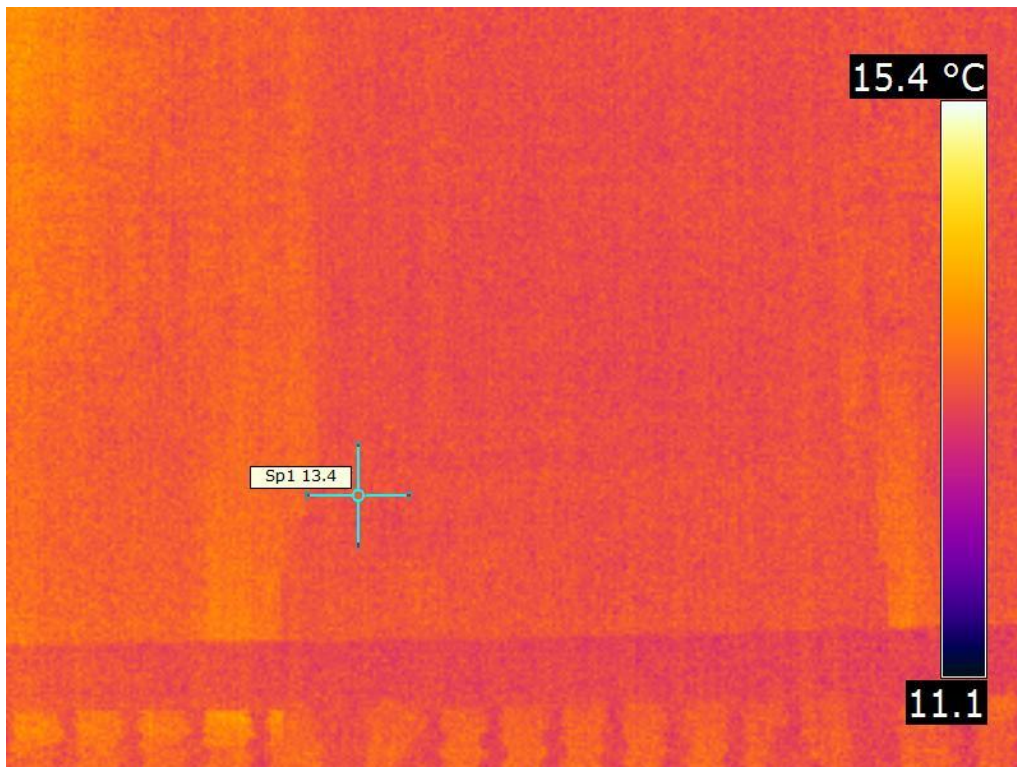


Figura 7.52 – Imagem termográfica do púlpito sul no dia 4 de Março de 2013



Figura 7.53 – Fotografia do púlpito sul

Na figura 7.54 encontra-se imagem termográfica da zona do altar-mor e na 7.56 uma imagem fotográfica da mesma zona. Verifica-se que as temperaturas variam entre 11,2°C e 13,3°C, sendo as mais baixas registadas na zona do altar-mor, sobre o arco do altar-mor nos arcos laterais do tecto. O altar-mor apresenta temperaturas baixas por ser uma zona enterrada em que as paredes ainda se encontram sobre influência das baixas temperaturas do Inverno.

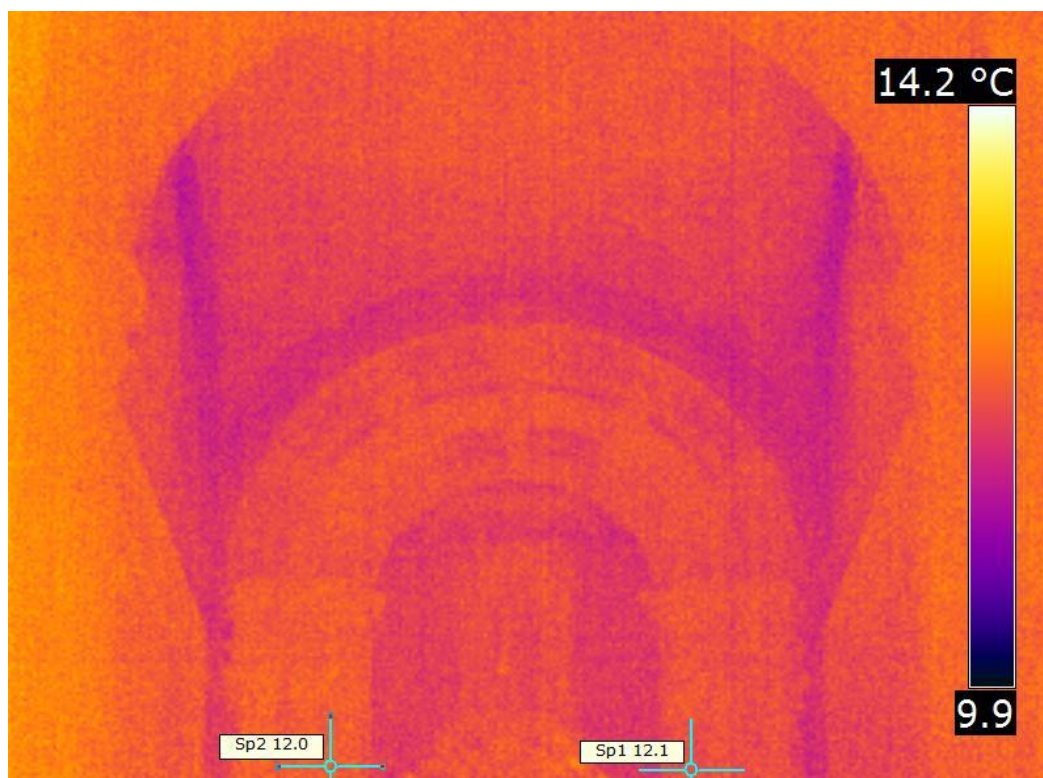


Figura 7.54 – Imagem termográfica do altar-mor e do tecto do altar-mor no dia 4 de Março de 201

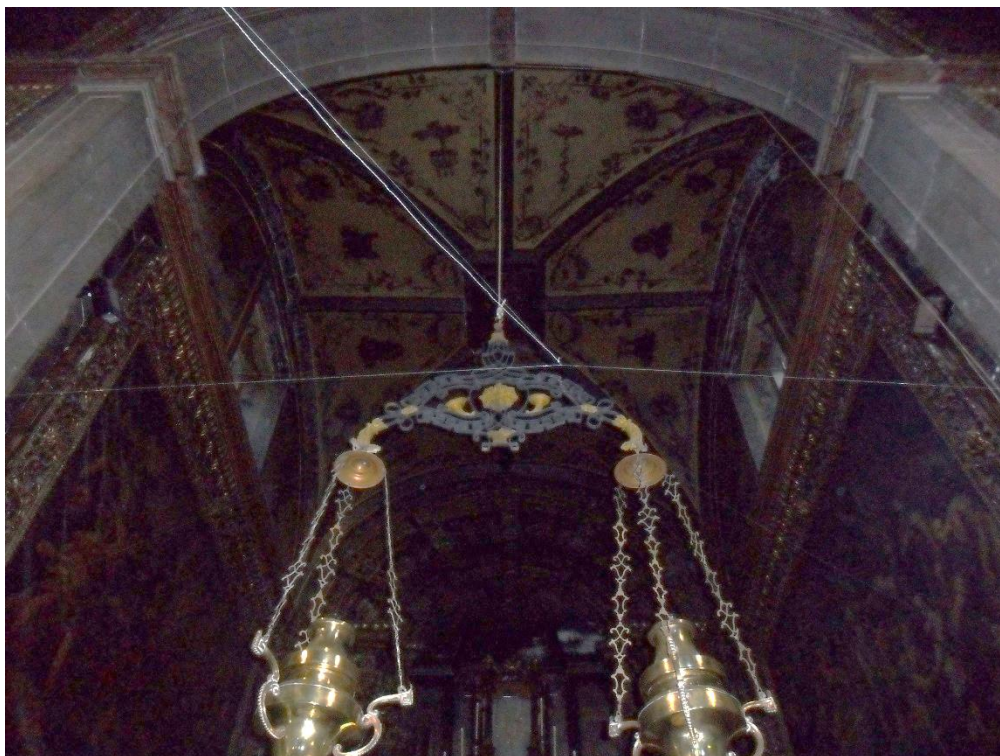


Figura 7.55 – Imagem fotográfica do altar-mor e do tecto do altar-mor

Nas figura 7.56 encontra-se uma imagem termográfica da zona inicial do altar-mor e na figura 7.57 uma imagem fotográfica dessa mesma zona. As temperaturas superficiais variam entre os 11,2°C e os 20,2°C, verificando-se que as temperaturas mais baixas registam-se na zona de junção das paredes.

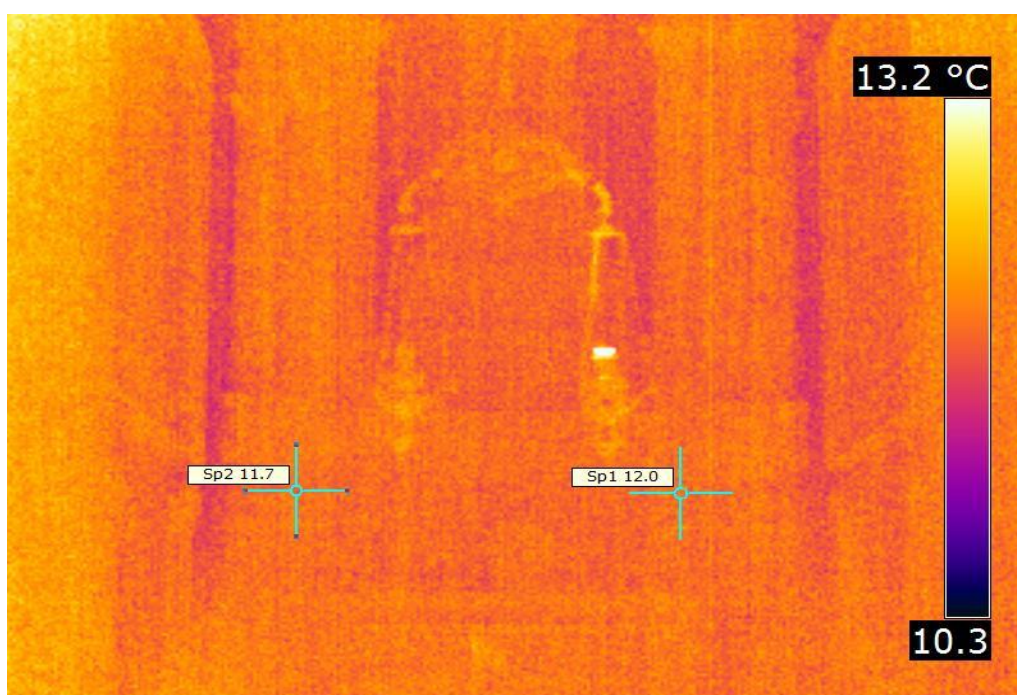


Figura 7.56 – Imagem termográfica do altar-mor no dia 4 de Março de 2013

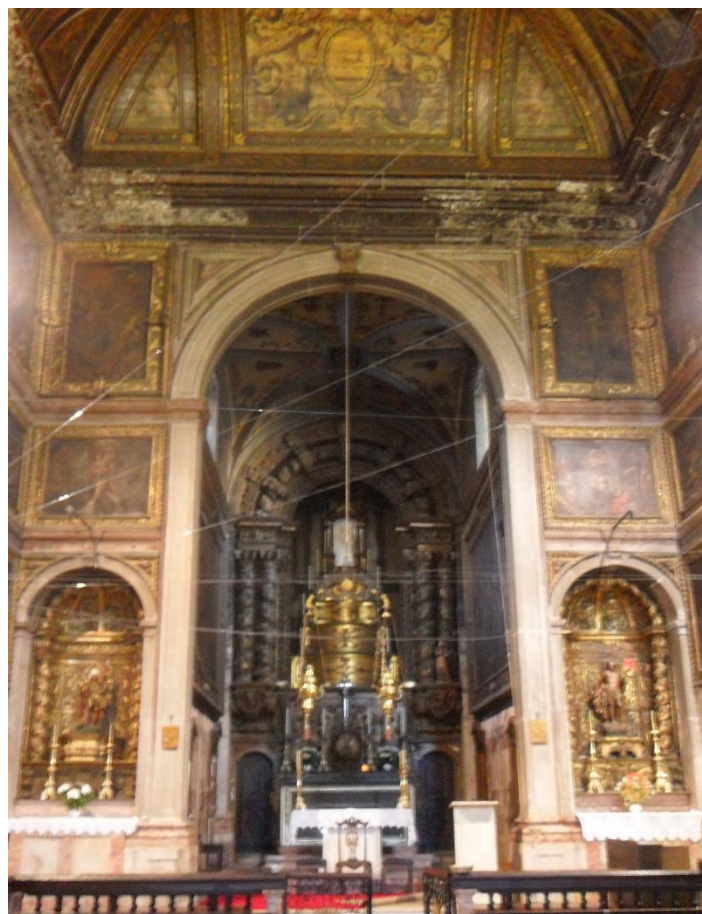


Figura 7.57 – Fotografia do altar-mor

Encontra-se na tabela 7.6 a temperatura superficial e a humidade relativa, para cada local, no dia 26 de Março de 2013.

Pode-se verificar que as temperaturas superficiais apresentam pequenas variações, encontrando-se compreendidas entre 13,9°C e os 14,7°C.

A humidade relativa também apresenta pequenas variações estando compreendida entre 81,7% e os 86,1%, ou seja, não são verificadas condições de saturação.

Tabela 7.6 – Temperatura superficial e humidade relativa no dia 26 de Março de 2013

Local	Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]
1 – Pavimento – Degrau Norte	14,6	81,9
2 – Pavimento	14,7	81,7
3 – Fachada Norte - Púlpito	14,5	82,8
4 – Fachada Norte - Entrada	14,3	84,0
5 – Fachada Norte - Púlpito	14,3	83,8
6 – Fachada Sul – Púlpito	14,2	84,4
7 – Fachada Sul - Entrada	14,2	84,3
8 – Pavimento - Entrada	14,2	84,1
9 – Pavimento – Degrau Sul	14,2	84,2
10 – Corredor	14,3	83,9
11 – Início do Altar - Sul	14,1	84,7
12 – Início do Altar - Norte	14,3	83,9
13 – Início do Altar - Pavimento	14,2	84,5
14 – Altar - Pavimento	14,2	84,7
15 – Altar - Pavimento	14,0	85,9
16 – Altar Sul	13,9	86,1
17 – Pavimento Altar	14,1	85,2

Encontra-se na figura 7.58 uma imagem termográfica do púlpito norte no dia 26 de Março de 2013. As temperaturas superficiais desta zona variam entre os 12,5°C e os 28,7°C. No entanto na zona da parede as diferenças de temperatura são muito pequenas, apenas no púlpito é que se verificam temperaturas elevadas devido à presença de uma fonte de calor nesse local (computador). À semelhança do dia 4 de Março verifica-se que as temperaturas mais baixas ocorrem no nicho de altar.

Na figura 7.59 encontra-se uma imagem termográfica da zona do púlpito sul. As temperaturas superficiais variam entre os 13,5 e 15,3. Verifica-se que nesta zona existe um aumento de temperaturas superficiais relativamente às registadas no dia 4 de Março, devido ao facto de a temperatura exterior se encontrarem a aumentar.

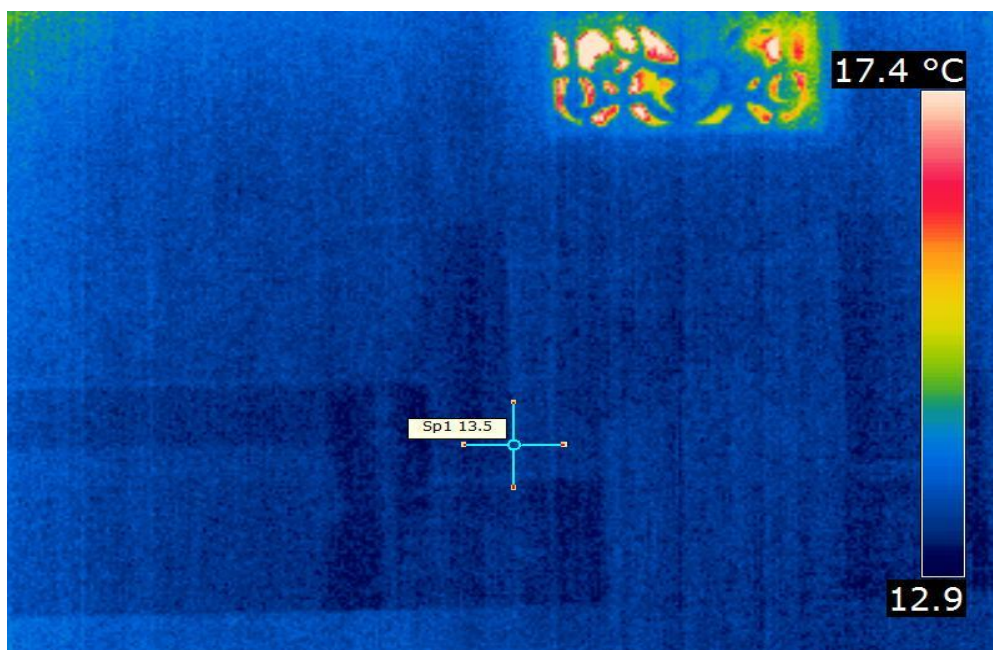


Figura 7.58 – Imagem termográfica do púlpito norte no dia 26 de Março de 2013

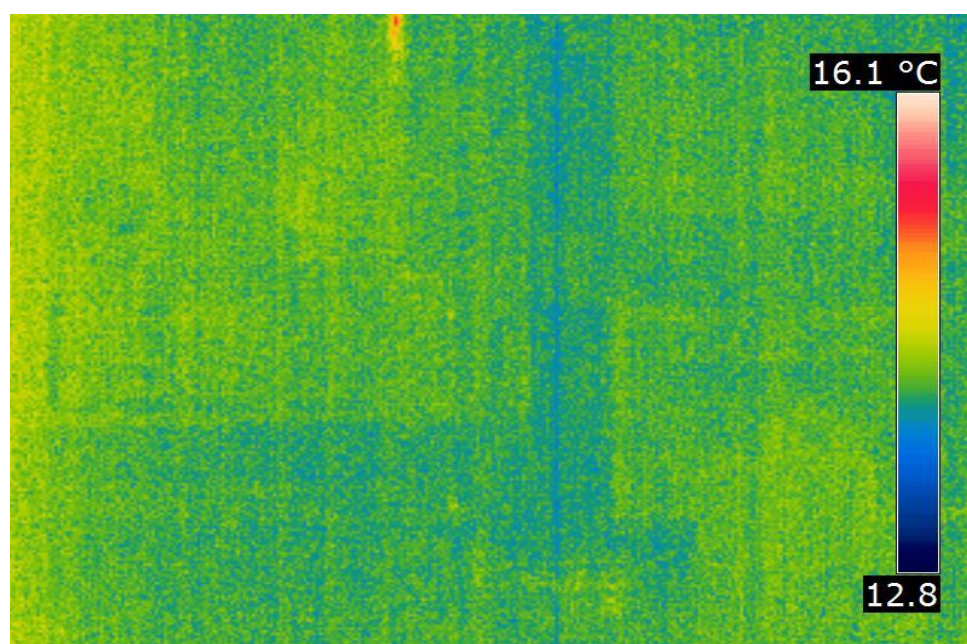


Figura 7.59 – Imagem termográfica do púlpito sul no dia 26 de Março de 2013

Na figura 7.60 encontra-se uma imagem termográfica da zona inicial do altar. As temperaturas superficiais variam entre 13,0°C e 15,3°C. O altar-mor apresenta temperaturas baixas por ser uma zona enterrada em que as paredes ainda se encontram sobre influência das baixas temperaturas do Inverno.

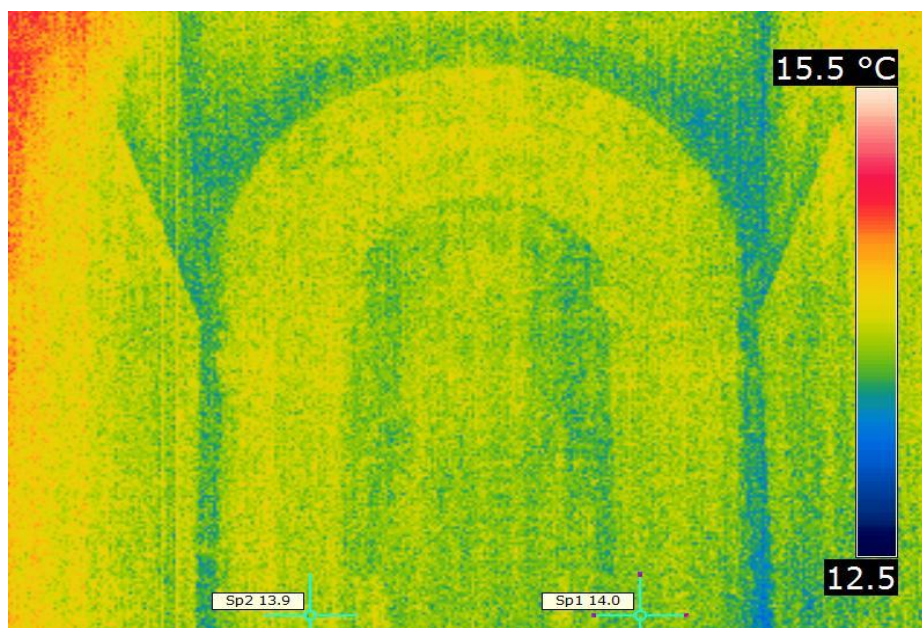


Figura 7.60 – Imagem termográfica do altar-mor no dia 26 de Março de 2013

Tabela 6.7 – Temperatura superficial e humidade relativa no dia 20 de Abril de 2013

Local	Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]
1 – Pavimento – Degrau Norte	16,5	65,4
2 – Pavimento	16,4	66,5
3 – Fachada Norte - Púlpito	16,3	66,9
4 – Fachada Norte - Entrada	16,4	66,5
5 – Fachada Norte - Púlpito	16,4	66,7
6 – Fachada Sul – Púlpito	16,2	67,6
7 – Fachada Sul - Entrada	16,1	68,4
8 – Pavimento - Entrada	16,3	68,1
9 – Pavimento – Degrau Sul	16,2	68,7
10 – Corredor	16,7	67,1
11 – Início do Altar - Sul	16,3	69,0
12 – Início do Altar - Norte	16,4	69,4
13 – Início do Altar - Pavimento	16,5	69,1
14 – Altar - Pavimento	16,4	69,4
15 – Altar - Pavimento	16,3	70,2
16 – Altar Sul	16,3	70,5
17 – Pavimento Altar	16,4	71,1

Encontra-se na tabela 7.6 a temperatura superficial e a humidade relativa, para cada local, no dia 20 de Abril de 2013.

Pode-se verificar que as temperaturas superficiais apresentam pequenas variações, encontrando-se compreendidas entre 16,1°C e os 16,7°C.

A humidade relativa também apresenta pequenas variações estando compreendida entre 68,4% e os 67,1%, ou seja, não são verificadas condições de saturação.

Encontra-se na figura 7.61 i8ma imagem termográfica da zona do púlpito norte do dia 20 de Abril de 2013. As temperaturas variam entre os 15,2°C e os 22,8°C. No entanto na zona da parede as diferenças de temperatura são muito pequenas, apenas no púlpito é que se verificam temperaturas elevadas devido à presença de uma fonte de calor nesse local (computador). Comparando com as figuras 7.50 e 7.58 verifica-se que as temperaturas superficiais mais baixas se registam no nicho de altar, embora o valor da temperatura seja superior. Este aumento de temperatura superficial deve-se ao facto de as temperaturas no exterior se encontrarem com tendência crescente.



Figura 7.61 – Imagem termográfica do púlpito norte no dia 20 de Abril de 2013

Na figura 7.62 encontra-se uma imagem termográfica do púlpito sul. As temperaturas superficiais variam entre 15,2 e 17,1. Verifica-se um relativamente às figuras 7.52 e 7.58 existe as temperaturas superficiais são superiores devido ao facto de a temperatura exterior se encontrar a aumentar.

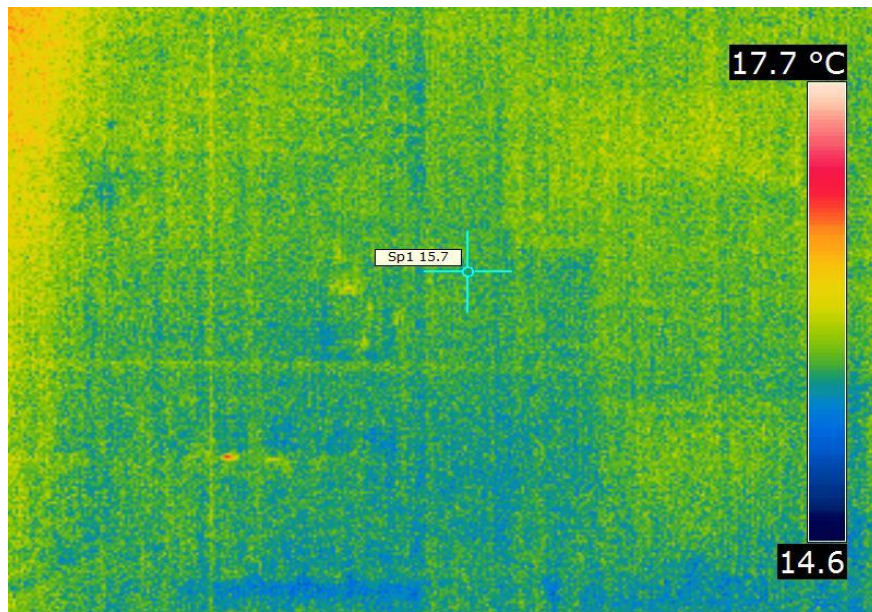


Figura 7.62 – Imagem termográfica do pulpito sul no dia 20 de Abril de 2013

Na figura 7.63 encontra-se uma imagem termográfica do altar-mor no dia 20 de Abril. As temperaturas superficiais variam entre 13,6°C e 17,8°C. Observa-se que as temperaturas superficiais mais baixas encontram-se nas paredes e no pavimento do altar-mor. O altar-mor apresenta temperaturas baixas por ser uma zona enterrada em que as paredes ainda se encontram sobre influência das baixas temperaturas do Inverno.

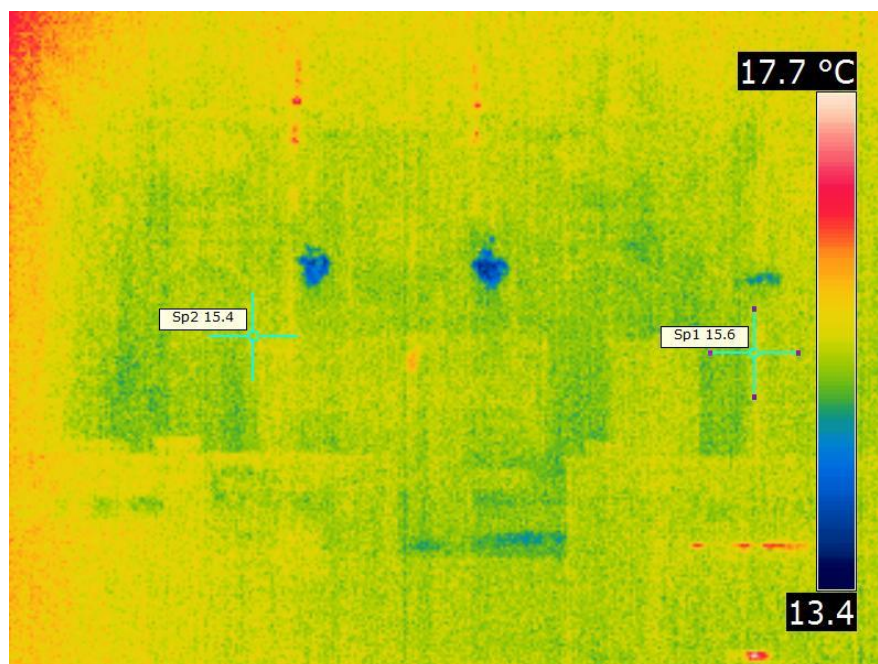


Figura 7.63 – Imagem termográfica do altar-mor no dia 20 de Abril de 2013

Encontra-se na figura 7.54 uma imagem termográfica da zona do coro e na na figura 7.65 uma imagem fotográfica dessa mesma zona. As temperaturas nesta zona encontram-se entre os 14,9°C e os 30,6°C. As temperaturas mais elevadas ocorrem nas janelas, nas caixilharias, enquanto nas paredes existe pequenas variações.



Figura 7.64 – Imagem termográfica do coro no dia 20 de Abril de 2013

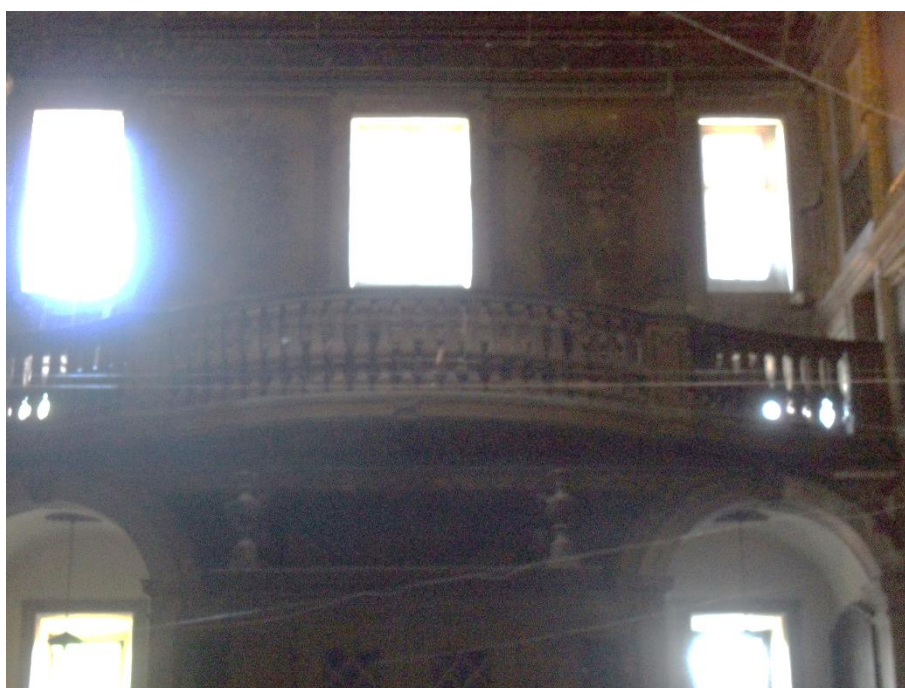


Figura 7.65 – Imagem fotográfica do coro

Na figura 7.66 encontra-se uma imagem termográfica do tecto da nave principal e na figura 7.67 uma fotografia do mesmo local. As temperaturas superficiais do tecto encontram-se entre

15,5°C e os 18,6°C. Verifica-se que as temperaturas superficiais mais baixas ocorrem nas nervuras.

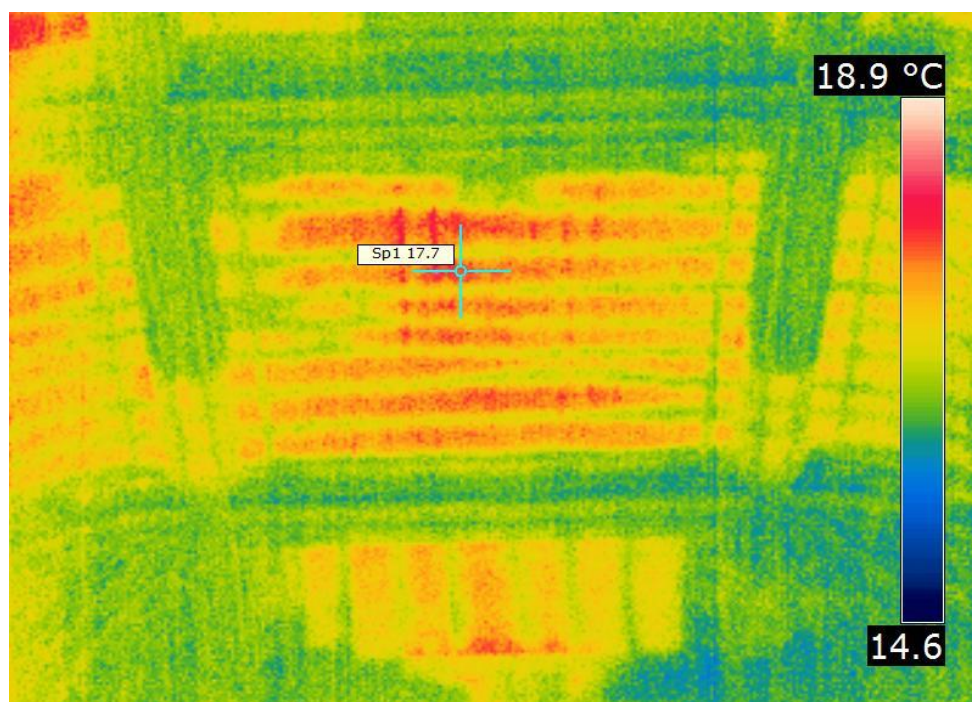


Figura 7.66 – Imagem termográfica do tecto no dia 20 de Abril de 2013

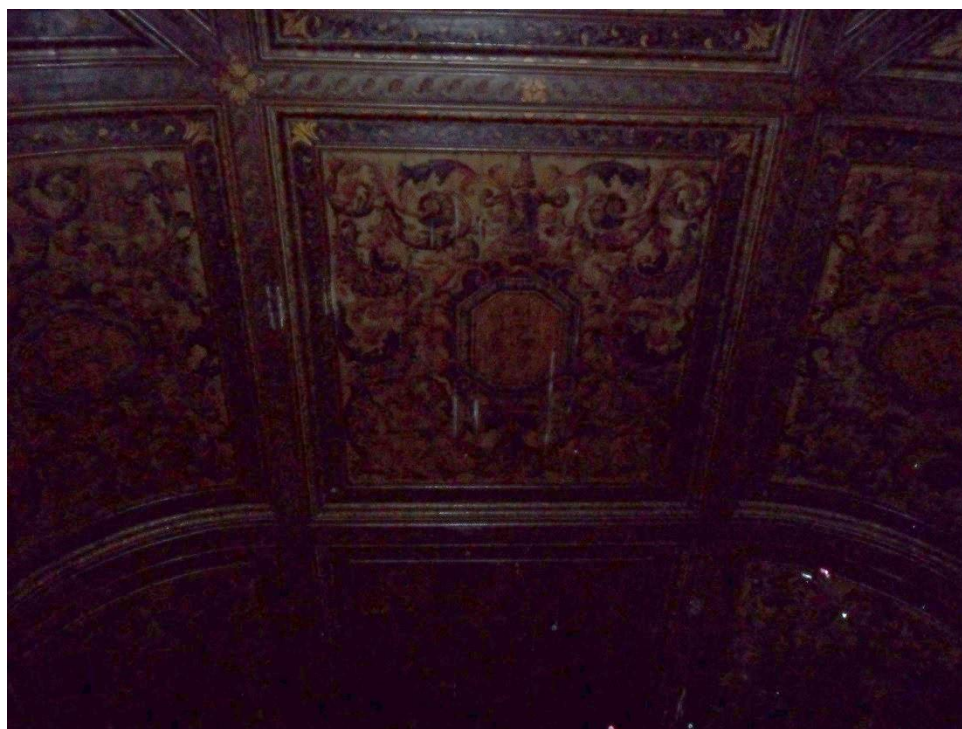


Figura 7.67 – Imagem fotográfica do tecto

7.3 Relação entre o clima interior e o exterior e análise dos ciclos diários e o seu efeito para a conservação

Pela figura 7.68 verifica-se que a temperatura média interior diminui de Novembro até Março, começando a aumentar a partir de Abril. Já no caso da temperatura média exterior verifica-se que diminui até Fevereiro passando aí a ter uma tendência ascendente. Durante a estação fria a temperatura média interior é superior à temperatura média exterior, pelo que se comprava que o calor acumulado pela igreja durante a estação quente é libertado durante a estação fria. Verificou-se ainda que os valores interiores eram muito constantes existindo maiores variações de temperatura média interior durante os meses de Junho e Julho, ocorrendo a maior variação durante o mês de Julho, com um mínimo de 20,6°C e um máximo de 25,7°C. No exterior o valor as temperaturas médias mais baixas ocorreram durante o mês de Fevereiro com um mínimo de 9,8°C.

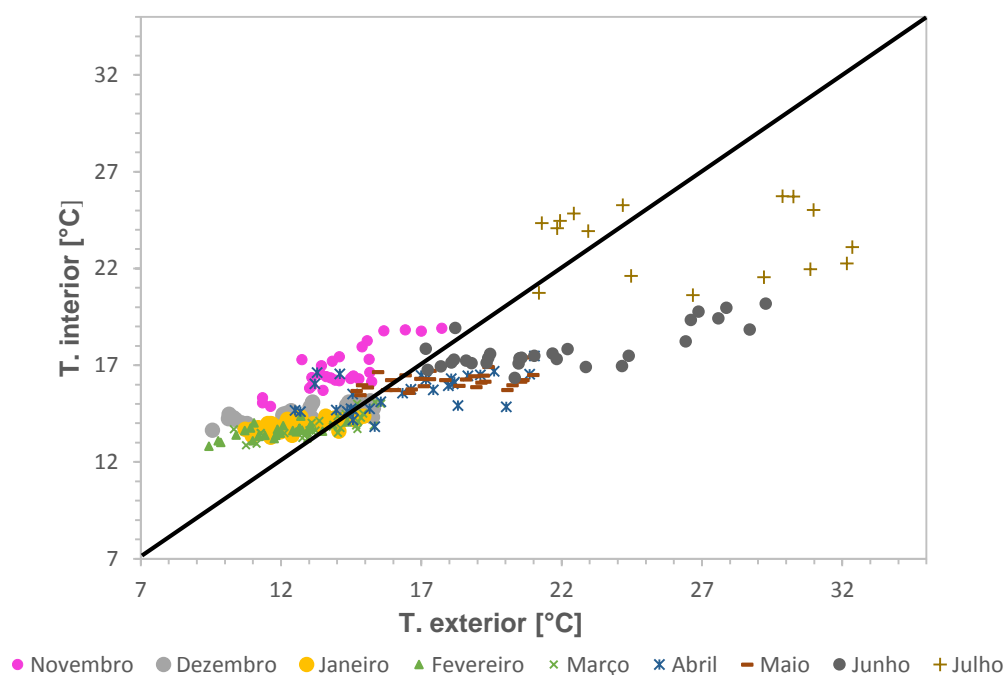


Figura 7.68 – Relação entre as temperaturas médias diárias exteriores e interiores entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

No que respeita à humidade relativa verificou-se pela figura 7.73 que os valores mais elevados a ocorrem no exterior até ao mês de Fevereiro, passando a partir dessa altura a ocorrer os valores mais elevados no interior. A humidade média diária variou no exterior entre os 32,4% e os 95,4% e no interior entre os 51,4% e os 77,0%.

7.3. Relação entre o clima interior e o exterior e análise dos ciclos diários e o seu efeito para a conservação

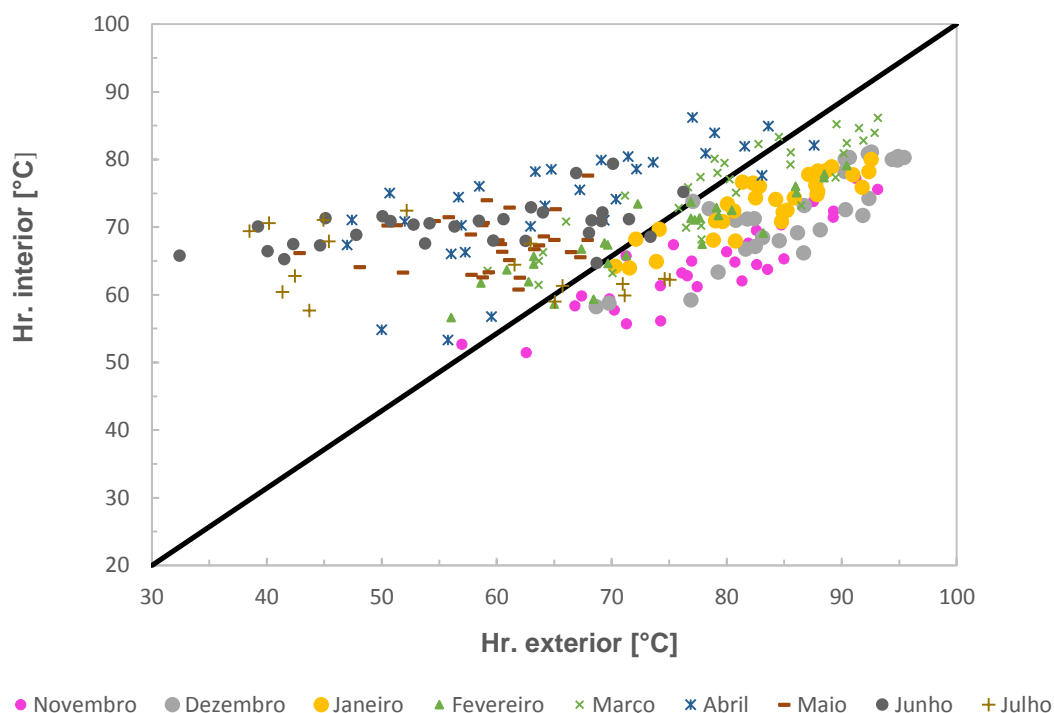


Figura 7.69 – Relação entre as humidades relativas médias diárias exteriores e interiores entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

Na secção 5.2.3 foi citado que embora as mudanças sazonais ocorram num período mais amplo são menos perigosas que os ciclos diários por estes serem repetitivos e actuarem de forma cumulativa até causar degradação por fadiga. Considera-se que em ciclos sustentáveis para a conservação podem ocorrer variações diárias de 3,2°C para a temperatura e 7% para a humidade relativa, considerando que quando se atinge o dobro destes valores pode ser desvantajoso para a conservação.

Na figura 7.70 encontram-se representadas as amplitudes dos ciclos diários de temperatura no interior do edifício no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013. Verifica-se que a partir do dia 2 de Abril as amplitudes dos ciclos diários aumentam, ultrapassando por vezes o limite de 3,2°C, mas nunca ultrapassando o dobro do seu valor.

Na figura 7.71 encontram-se representadas as amplitudes dos ciclos diários de humidade relativa no interior do edifício no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013. Verifica-se que a amplitude média diária da humidade relativa ultrapassa o valor recomendado de 7%, ultrapassando em 30 dias os 14%.

Conclui-se que em termos de temperatura as amplitudes diárias não são prejudiciais para a conservação dos materiais e artefactos. Em termos de amplitude humidade relativa média diária verifica-se que está pode ser prejudicial para a conservação, pois além de ultrapassar o valor recomendado de 7% em 30 dias ultrapassa o dobro desse valor.

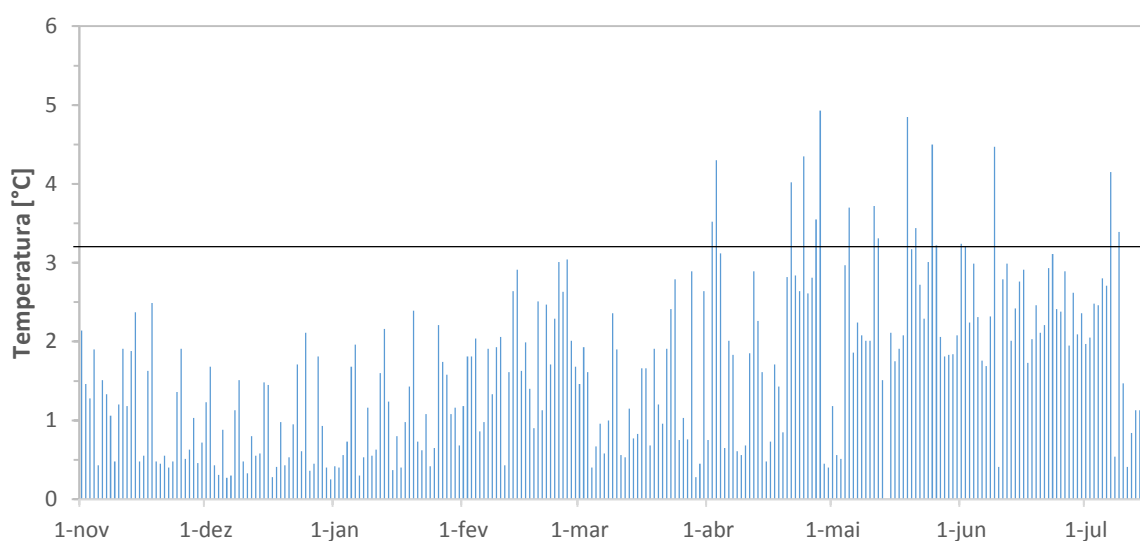


Figura 7.70 – Amplitude para os ciclos diários de temperatura no interior da Igreja no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

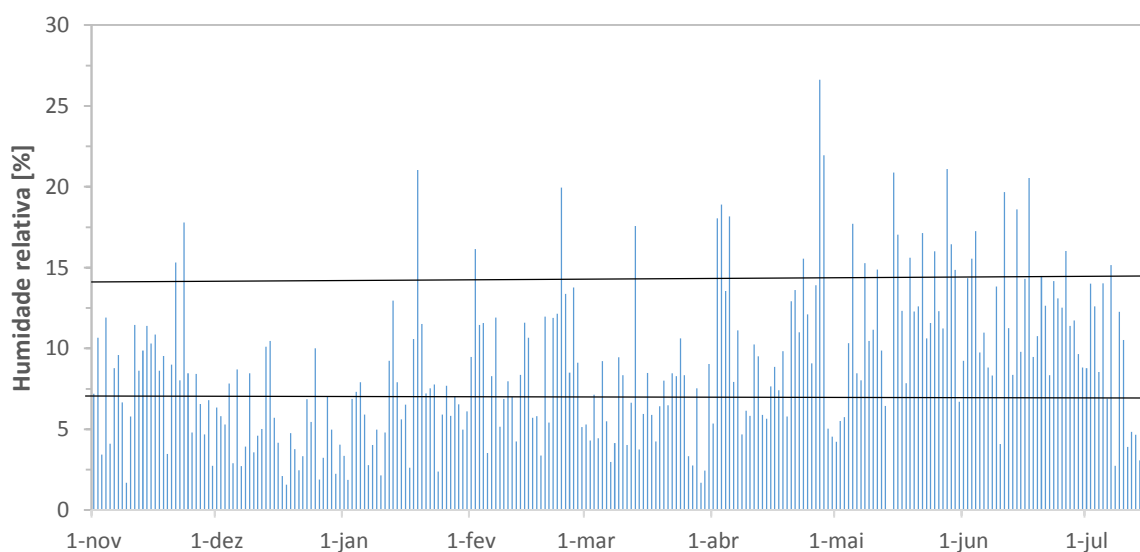


Figura 7.71 – Amplitude para os ciclos diários de temperatura no interior da Igreja no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

Na figura 7.72 encontra-se representada a temperatura média diária ao longo do período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013. Em termos de temperatura a especificação ASHRAE especifica que esta deve estar compreendida entre os 15°C e os 22°C. Através da análise da figura 7.72 verificou-se que entre o dia 29 de Novembro de 2012 e o dia 10 de Abril de 2013 a temperatura média interior é inferior ao limite mínimo de 15°C citado na especificação ASHRAE. Observou-se ainda que a partir do dia 6 de Julho de 2013 a temperatura média diária ultrapassa o limite máximo de 22°C. Conclui-se que através desta análise que segundo a especificação ASHRAE que os materiais e os artefactos da igreja não se encontram em condições favoráveis à sua conservação.

7.3. Relação entre o clima interior e o exterior e análise dos ciclos diários e o seu efeito para a conservação

Na figura 7.73 encontra-se representado a humidade relativa média diária no interior da igreja no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013. Em termos de humidade relativa esta especificação afirma que o nível de humidade relativa a longo prazo pode ser 50% ou um valor baseado na média anual. Neste caso, por não se ter um ciclo anual completo realiza-se a análise para o valor de 50%. Verificou-se que a humidade relativa média diária no interior da igreja varia entre os 51,4°C e os 77,0%, afastando-se do valor ideal de 50%.

Conclui-se que segundo a especificação ASHRAE o microclima interior da igreja não é favorável para a conservação dos materiais e artefactos.

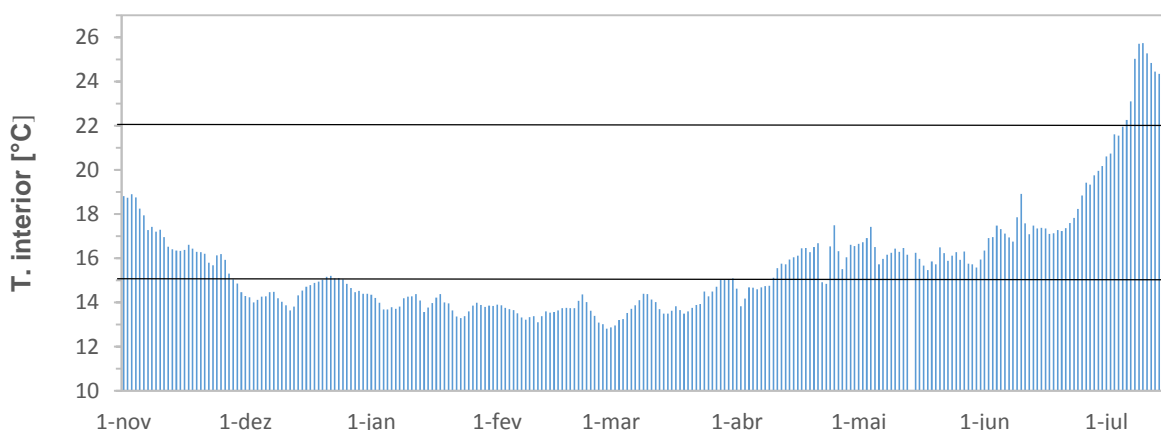


Figura 7.72 – Temperatura média diária no interior da igreja entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

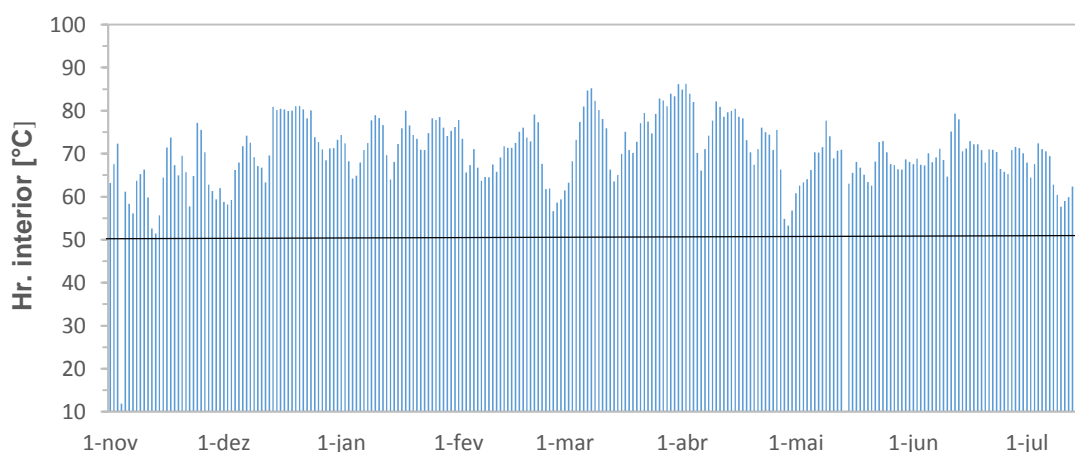


Figura 7.73 – Humidade relativa média diária no interior da igreja entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013

7.4 Análise comparativa

Durante o período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012, com a excepção do período entre 18 de Janeiro e 14 de Fevereiro realizou-se um estudo com o intuito de caracterizar o microclima interno da Igreja de São Cristóvão [34]. Para a realização desse estudo foram utilizados os mesmos sensores do que no presente trabalho, assim como foram adoptadas as mesmas localizações para os sensores. Deste modo torna-se possível realizar uma análise comparativa entre os dois períodos estudados.

Na figura 7.74 encontra-se representado a evolução da temperatura para o exterior, interior e centro da nave a uma altura de 3,90m no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012.

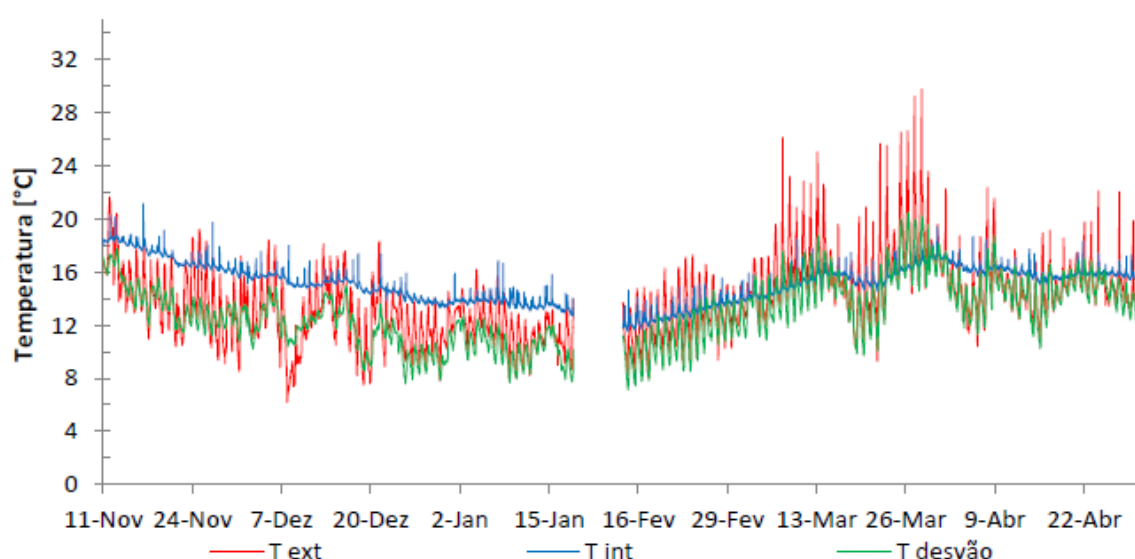


Figura 7.74 – Evolução da temperatura no exterior e interior da igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]

Observa-se que tal como na figura 7.1 as variações diárias acompanham as variações exteriores, mas são menos acentuadas e apresentam um atraso, justificado pela forte inércia térmica do edifício. Verificou-se que durante o período de estudo representado na figura 7.76 as temperaturas exteriores são menos sinuosas do que no período representado na figura 7.1 o que origina com que no interior as variações de temperatura sejam mais ténues. À semelhança da figura 7.1 verificou-se que no desvão da cobertura as variações são menos acentuadas do que no exterior devido resistência térmica da cobertura.

Na figura 7.75 encontra-se representado a evolução da humidade relativa para o exterior, interior e centro da nave a uma altura de 3,90m.

Tal como representado na figura 7.3 verifica-se que os valores no interior e no desvão da cobertura acompanham as tendências da humidade relativa no exterior, sendo que é no desvão que se registam os maiores valores de humidade relativa. A humidade relativa no interior, nunca ultrapassou os 80%. Durante os meses de Fevereiro, Março e Abril os valores da humidade relativa interior que se encontra representada na figura 7.3 são superiores aos

que se encontram representados na figura 7.74 devido ao facto de o Inverno 2011/2012 ser bastante mais seco comparativamente com o Inverno 2012/2013.

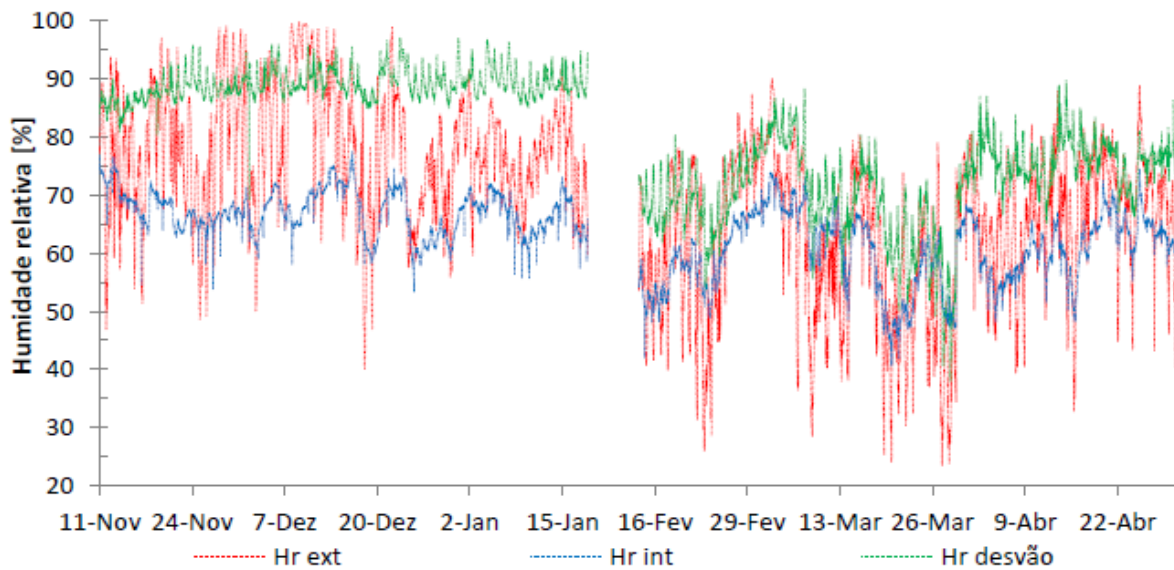


Figura 7.75 – Evolução da humidade relativa no exterior e interior da igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]

Na figura 7.76 representado a evolução da temperatura e da humidade relativa ao longo de uma coluna vertical colocada junto do púlpito norte no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012.

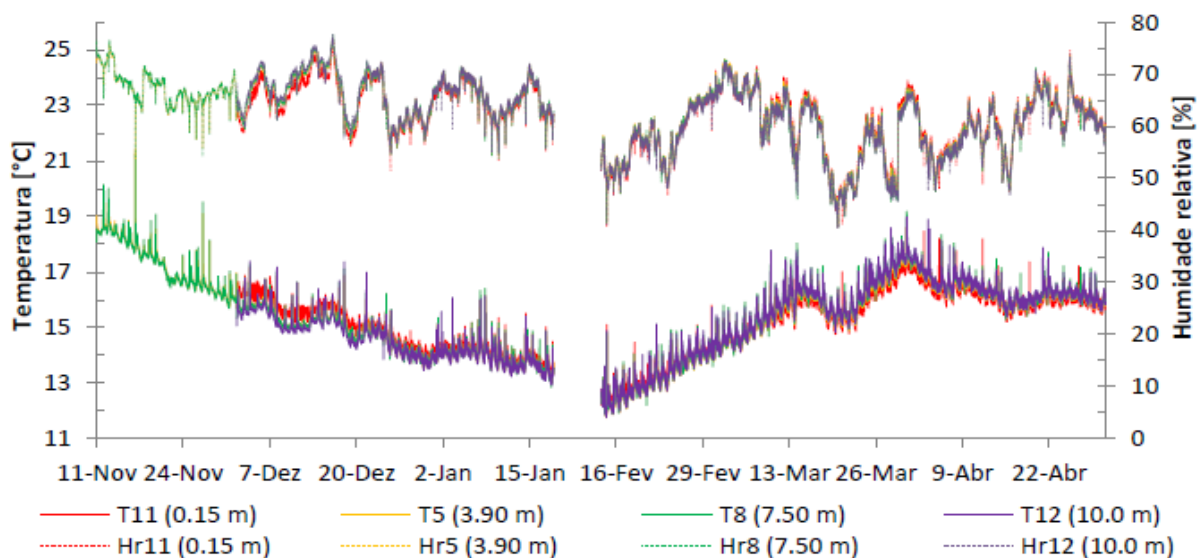


Figura 7.76 – Evolução da temperatura e da humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]

Através da figura 7.76 verifica-se que até dia 16 de Fevereiro existe a presença de correntes convectivas no interior da igreja, devido ao facto de do pavimento de encontrar mais quente do que a cobertura. O pavimento, em contacto com o solo e com uma elevada inércia térmica, armazenou calor durante a Primavera/Verão, observando-se um desfasamento sazonal em relação à temperatura exterior. Já a cobertura, que se encontra em contacto directo com o exterior, está mais dependente das alterações ocorridas. O ar, ao contactar com as temperaturas mais quentes no pavimento, vai subir sucessivamente, até entrar em contacto com a cobertura, onde vai arrefecer e ganhar massa, até ser obrigado a descer novamente.

De 16 de Fevereiro a 7 de Março confirma-se a inversão da tendência, com as temperaturas junto à cobertura a aproximarem-se até ao ponto de cruzamento com as do pavimento. Contudo, só a partir de dia 8 de Março a temperatura junto ao pavimento apresenta valores abaixo das restantes, iniciando-se um novo ciclo, correspondente com o aumento das temperaturas exteriores. Devido ao atraso provocado pela elevada inércia térmica do edifício, no início da Primavera/Verão o pavimento encontra-se mais frio, mantendo-se sob influência das condições verificadas durante o Outono/Inverno. Por outro lado, a cobertura, em contacto com as temperaturas mais elevadas, aquece. Encontram-se assim reunidas as condições para a estratificação do ar por temperaturas, aumentando gradualmente desde o pavimento até à cobertura [34].

Comparando estes dados com o que se encontra representado na figura 7.10 conclui-se que, para o estudo realizado para o período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013, a estratificação do ar por temperaturas ocorre bastante mais tarde, pois só se verifica a inversão da tendência das correntes convectivas a 27 de Abril de 2013. Tal pode ser justificado pelo facto de o início do ano de 2013 ser bastante chuvoso, caracterizado por dias húmidos e nublados o que impediu que a temperatura da cobertura aumentasse de tal forma que ultrapassasse a temperatura do pavimento.

Para o período representado na figura 7.76 e 7.10 verifica-se que as humidades relativas para as várias alturas apresentam pequenas variações entre si, com valores máximos próximos dos 80% e 90%, respectivamente e com valores mínimos próximos dos 40% para ambos os casos.

Na figura 7.77 representado a evolução da temperatura e da humidade relativa superficial e do ar no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012.

Como se pode observar na figura 7.77 até 30 de Dezembro as temperaturas superficiais apresentam valores médios superiores às da temperatura do ar, devido à elevada inércia térmica da parede, observando-se um maior atraso e amortecimento dos ciclos sazonais. Comparando com a figura 7.13 verificou-se que está inversão apenas ocorreu a 24 de Abril.

Em termos de humidade relativa verificou-se pela figura 7.77 que as humidades relativas interiores e superficiais como do ar nunca ultrapassaram os 80%. Pela figura 7.13 verificou-se que nunca ultrapassou os 85,0% ao longo de todo o período.

Verificou-se que em ambos os períodos não se comprova a ocorrência de condensações superficiais. Mesmo quando as temperaturas superficiais são inferiores as temperaturas do ar, que torna possível a existência de condensações superficiais, não se verificam condições necessárias para a saturação devido ao facto de a temperatura interior nunca atingir valores baixos que provocassem um aumento brusca da humidade relativa interior que pudesse levar à ocorrência de condensações.

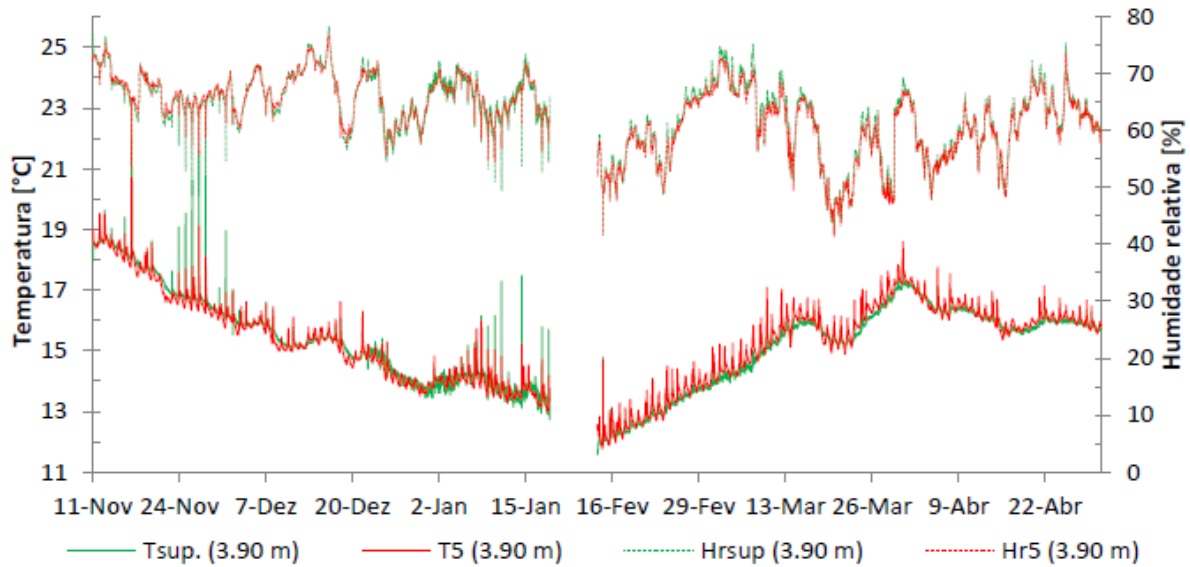


Figura 7.77 – Evolução da temperatura e da humidade relativa superficial e do ar no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]

Na figura 7.78 encontram-se representadas as amplitudes dos ciclos diários de temperatura no interior do edifício no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012. Comparando com figura 7.70, que na figura 7.70 observam-se que as amplitudes são superiores às representadas na figura 7.78, chegando a ultrapassar o valor limite de 3,2°C.

Na figura 7.79 encontram-se representadas as amplitudes dos ciclos diários de humidade relativa no interior do edifício no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012. Comparando com a figura 7.71 verifica-se que as amplitudes representadas na figura 7.71 são superiores às representadas na figura 7.79. Em ambos os casos representados, verifica-se que a amplitude média diária da humidade relativa ultrapassa em determinados dias o valor recomendado de 7%.

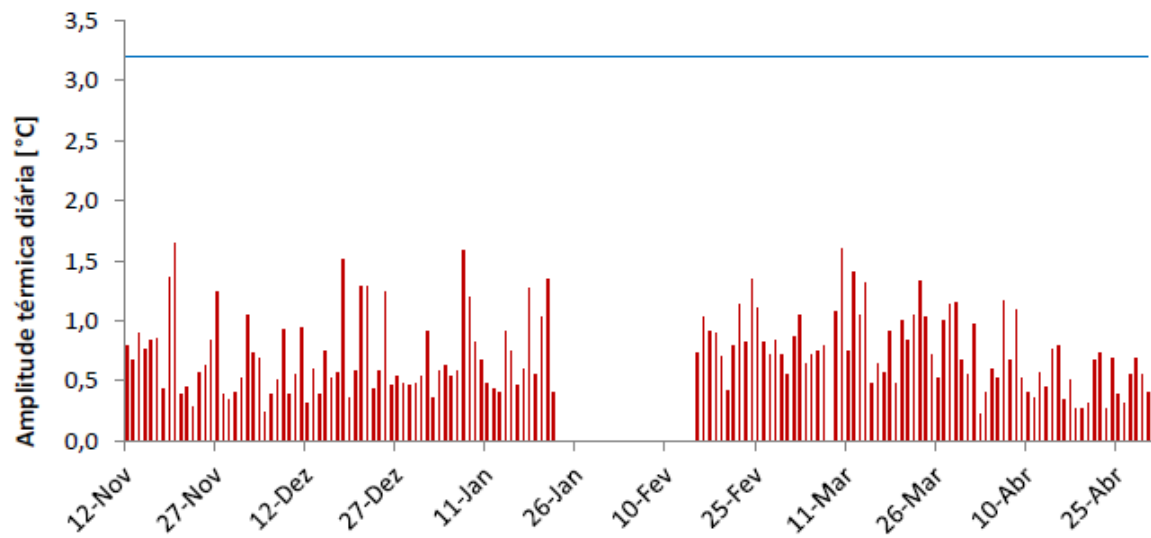


Figura 7.78 – Amplitude para os ciclos diários de temperatura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]

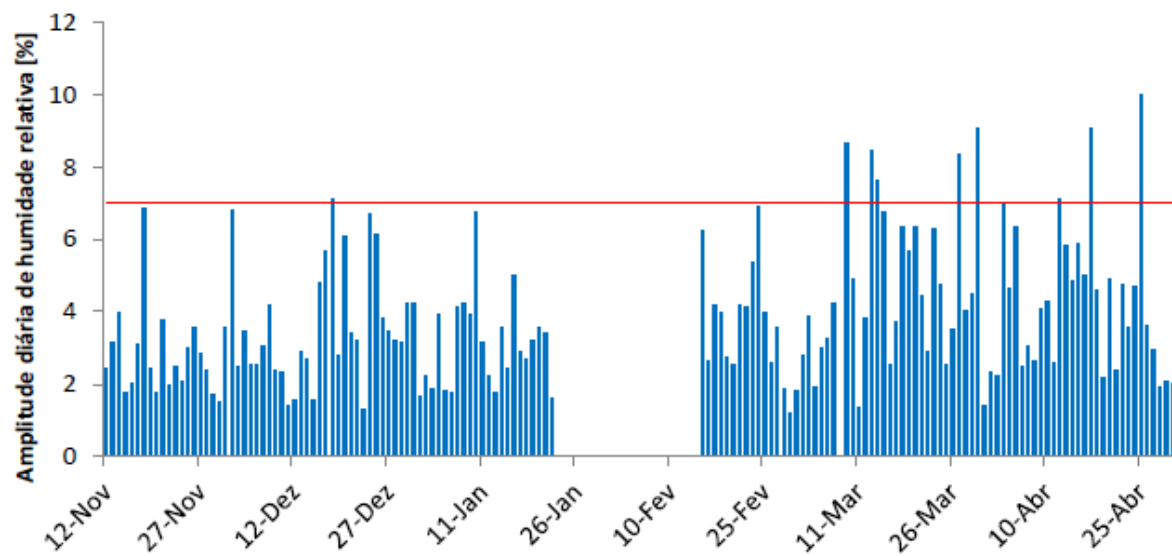


Figura 7.79 – Amplitude para os ciclos diários de humidade relativa no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012 [34]

Capítulo 8

Conclusões e desenvolvimentos futuros

No presente trabalho realizou-se o estudo das condições higrotérmicas no interior e exterior da igreja de São Cristóvão, em Lisboa, no período compreendido entre 1 de Novembro de 2012 e 16 de Julho de 2013.

Para tal foram efectuadas leituras das temperaturas e humidade ao longo da igreja. Foram colocados no interior da igreja vinte e cinco sensores distribuídos em planta e em altura. Foi ainda colocado um sensor na torre norte e outro no desvão da cobertura. Os sensores efectuaram registos a cada 10 minutos. De forma complementar, realizaram-se duas baterias de leituras de temperatura do ar e humidade relativa em trinta e quatro pontos ao longo da nave principal da igreja. Realizaram-se também, medições de temperaturas superficiais em dezassete pontos e recolheram-se imagens de termografia ao longo de nave principal.

Verificou-se que o clima interior da nave principal é mais estável do que o clima exterior justificado pelo facto de o edifício apresentar elevada inércia térmica. Verifica-se que a sacristia é a zona mais fria durante o período de Outono/Inverno pelo facto de se encontrar orientada a norte recebendo menos radiação solar. No período de Primavera/Verão as temperaturas mais baixas ocorrem no interior da nave principal, justificado pelo facto de a nave se encontrar no centro do edifício não sendo tão influenciado pelas temperaturas exteriores quanto a sacristia e a casa mortuária. As temperaturas registadas no altar-mor acompanham as tendências das temperaturas da nave principal, mas são superiores às na nave principal. Em termos de humidade relativa verificou-se que no período de Outono/Inverno os valores mais elevados ocorrem na sacristia e no interior da nave principal os valores mais baixos. Já no período de Primavera/Verão a humidade relativa na sacristia diminuem e passam a ser registados os valores mais elevados no altar-mor, devido a ser o local onde existe uma menor ventilação. Observou-se ainda que o desvão apresenta variações de temperatura mais ténues que no exterior devido à resistência térmica da cobertura e elevados níveis de humidade relativa devido à sua fraca ventilação.

Na coluna vertical verifica-se que até ao dia 26 de Abril não existe estratificação do ar por temperaturas. Até esse dia o ar junto da cobertura encontra-se mais baixo do que o ar junto do pavimento devido à cobertura se encontrar mais fria devido ao seu contacto com o exterior.

Neste período formam-se correntes convectivas devido ao ar quente junto do pavimento (e com menor densidade) sobe até à cobertura onde é arrefecido e ganha densidade descendo novamente até ao pavimento. A 26 de Abril a temperatura da cobertura começa a aumentar, logo ar junto do topo tem uma temperatura superior ao ar junto do pavimento pelo que começa a formar-se estratificação do ar por temperaturas. Apenas durante o mês de Junho é que se verifica a estratificação total do ar por temperaturas.

Ao longo do período verifica-se que a tendência de as temperaturas mais baixas se encontrarem a sul, as intermédias a norte e as mais baixas no centro. Tal pode ser justificado de durante o período Outono/Inverno as paredes se encontrarem a libertar calor absorvido durante a estação quente influenciando os sensores junto das paredes a registarem valores superiores às registadas no centro da nave principal. No período Primavera/Verão o sensor no centro da nave principal tem uma maior interioridade não tão sendo influenciado pelas temperaturas exteriores quanto os sensores colocados junto das paredes laterais da nave.

Durante o período de Outono/Inverno a temperatura superficial de uma superfície foi superior à temperatura superficial do ar à mesma altura. Este facto é justificado por as paredes terem elevada inércia térmica, pelo que ainda se encontram a libertar energia acumulada durante o Verão. Na Primavera verificou-se que a temperatura superficial passa a ser inferior à temperatura do ar. Apesar disto a temperatura nunca desceu o suficiente para a formação de condensações superficiais sendo o valor máximo de humidade relativa 75%.

Conclui-se que a temperatura e humidade relativa média diária podem ser prejudiciais para a conservação dos materiais e artefactos, assim como a amplitude média da humidade relativa.

Com o desenvolvimento deste estudo conclui-se que existem aspectos que devem ser investigados, tais como:

- Continuação de um estudo com um período total de um ano para que se consiga um ciclo anual completo, para que se possa analisar os ciclos sazonais na totalidade;
- Monitorização das condições superficiais numa parede a sul para se poder comprovar o risco de condensações superficiais;
- Utilizar um sensor de resposta rápida para as medições manuais para o mapeamento da nave principal, de modo a se poder realizar mais medições;
- Alargar este tipo de estudo a outras igrejas e edifícios históricos.

Bibliografia

- [1] AFONSO, M. I. A. S. P. - *Simulação Higrotérmica de Edifícios*. Dissertação de Mestrado. Porto: FEUP, 2011.
- [2] ALMEIDA, C. C. P. – *Análise e reabilitação estrutural de um edifício*. Tese de Mestrado – Especialização em Estruturas. Porto: FEUP, 2012.
- [3] ALMEIDA, D.Fernando de - *Monumentos e edifícios notáveis do distrito de Lisboa*, volume V, primeiro tomo, 1973.
- [4] AZEVEDO, J. C. – *Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção*. Tese de Mestrado – Perfil de Construção. FCT-UNL: Lisboa, 2011.
- [5] AZEVEDO, J. M. C. B. – *Absorção por Capilaridade de Soluções Aquosas Salinas em Materiais Porosos*. Dissertação de mestrado. IST: Lisboa, 2013.
- [6] BARROS, E.L.B.D. – *Optimização de Envolvente de Edifícios Antigos numa Perspectiva Energética e de Conforto*. Dissertação de mestrado. FUEP: Porto, Janeiro 2012.
- [7] BRATASZ, L., D. CAMUFFO, e R. KOZLOWSKY - *Target microclimate for preservation derived from past indoor conditions*. Museum Microclimates, T. Padfield & K. Borchersen (eds.) National Museum of Denmark, 2007: 129-134.
- [8] BRATASZ, Lukasz - *Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines*. Climate for collections, Standards and uncertainties. Munich 2012.
- [9] CAMUFFO, D. – *Microclimate for Cultural Heritage*. Amsterdam: Elsevier, 1998.
- [10] CAMUFFO, D., A BERNARDI, G. STURANO, and A. VALENTINO. - *The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence*. Journal of Cultural Heritage, vol. 3, Abr-Jun 2002: 155-161.
- [11] CAMUFFO, D., E.PAGAN, A. BERNARDI e F. BECHERINI – *The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study*. Journal of Cultural Heritage, vol.5, Out-Dez 2004:409-416
- [12] CLARA, E. – *Igreja de São Cristóvão – Projecto de financiamento*. Lisboa, 2012.

Bibliografia

- [13] Conclusões da Conferencia Internacional de Atenas sobre o Restauro dos Monumentos - Carta de Atenas, 1931
- [14] CORREIA, J. T. de J. M. - *Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes*. Dissertação de Mestrado – Perfil Construção. FCT-UNL, 2013.
- [15] Diário da República, Lei nº107/2001 – Estabelece as bases da política e do regime de protecção e valorização do património cultural.
- [16] DUARTE, F.M.S.R.F. – *Contributo para o estudo de um patamar mínimo de inércia térmica em edifícios em reabilitação*. Dissertação do MIEM. FUEP: Porto, Março 2013
- [17] FARIA, L. M.I.T de – *Aplicação da Termografia ao Diagnóstico de Edifícios*. Dissertação de para grau de mestre em Engenharia Civil. FEUP: Porto, Julho de 2011.
- [18] FREITAS, V. P. - *Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios*. Dissertação de Doutoramento. FUEP: Porto, 1992.
- [19] HENRIQUES, F. M. A. – *Comportamento higrotérmico de edifícios*. FCT-UNL, Lisboa.
- [20] HENRIQUES, F.M.A. - *Humidade em Paredes*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
- [21] *HOB0 U12 Temp/RH/2 External Data Logger*. Onset Computer Corporation, 2009-2010.
- [22] <http://pedrojhernandez.com/2014/03/08/capacidad-calorifica-e-inercia-termica/> (consultado em 20/3/2014)
- [23] <http://www.deltat.com/thermocouple.html> (consultado em 11-06-2013)
- [24] <http://www.guiadacidade.pt/pt/poi-igreja-de-sao-cristovao-17801> (consultado em
- [25] <http://www.infopedia.pt/lingua-portuguesa/conserva%C3%A7%C3%A3o> (consultado em 08-08-2013).
- [26] http://www.jf-scrivovao.pt/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=30 (consultado a 29-05-2013)
- [27] <https://www.infopedia.pt/lingua-portuguesa/cultura> (consultado a 12-12-2012)
- [28] LANDIM, P.M.B., R.C. MONTEIRO, e A.C. CORSI. - *Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER*. Rio Claro - Brasil: UNESP, 2002.
- [29] *Manual do utilizador para ThermaCAM B4*. Flir Systems, 2006.
- [30] MONSALVE, M. – *Igreja Paroquial de S. Cristovão. Relatório de inventário e diagnóstico*. Lisboa, Fevereiro 2011.

- [31] Princípios para a conservação e o restauro do património construído - Carta de Cracóvia, 2000.
- [32] SAMEK, L. et al. - *The impact of electric overhead radiant heating on the indoor environment of historic churches*. Journal of Cultural Heritage, vol.8, 7 Dec 2006-19 Mar 2007, 361-369
- [33] SILVA, H. E., HENRIQUES, F. M. A. – *Estudo do microclima da igreja de São Cristóvão*. Congresso Construção. Coimbra, 2012
- [34] SILVA, H. F. E. – *Avaliação do Clima Interior de uma Igreja em Lisboa*. Tese de Mestrado - Perfil de Construção. FCT-UNL: Lisboa, 2012
- [35] SILVA, Tânia Alexandra Lopes da – *Estudo Experimental do Comportamento Higrotérmico de Igrejas*. Dissertação de Mestrado. Porto: FEUP, 2008.
- [36] *Sociedade para a Preservação do Património Construído – A Carta de Veneza*, 1964.
- [37] UNI EN 15757:2010 – Conservation of Cultural Property Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Milan, Italia, 2010.
- [38] *User Manual for DL2e Data Logger Getting Started*. Delta-T Devices Ltd, 2001.
- [39] *User Manual for DL2e Data Logger Hardware Reference*. Delta-T Devices Ltd, 2000.
- [40] *User Manual for the Hydrolog HL-NT*. Rotronic.
- [41] *User Manual for the RH and Air Temperature Sensors*. Delta-T Devices Ltd, 2000.
- [42] VAZ, R. M. F. Á. G. – *Património: Intervir ou Interferir?* Departamento de Arquitectura. Coimbra: FCT, 2009